

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«__» _____ 20__ р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно - інтегровані
технології та системи навігації і керування»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»
на тему: «Маятниковий мікромеханічний акселерометр»**

Виконав:

студент III курсу, групи ПГ-п71

Михайло ТІСТОЛ _____

Керівник:

Асистент каф. ПСОН

Олександр САПЕГІН _____

Рецензент:

Асистент каф. ІВТ

Віталій ІВАСЕНКО _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет Приладобудівний
(повна назва)

Кафедра Приладів і систем орієнтації та навігації
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Надія БУРАУ
(ініціали, прізвище)

(підпис)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту
Тістолу Михайлу Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Мікромеханічний маятниковий акселерометр

керівник проекту Олександр САПЕГІН,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 р. № 1180-с

2. Строк подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту Мікроелектромеханічний акселерометр; матеріал виготовлення Кремній, амплітуда вібрації основи до ; лінійне перевантаження основи до 2g, вібрація основи з амплітудою до 0.1 g і частотою 100 Гц. Максимальна амплітуда коливань чутливого елемента 0.2⁰.

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) 1. Огляд сучасних мікромеханічних акселерометрів. Вибір конструктивної схеми. 2. Синтез математичної моделі мікромеханічного акселерометру. 3. Створення тривимірної моделі чутливого елемента та основи акселерометру. Розрахунок основних конструктивних параметрів чутливого елемента. 4. Створення імітаційної програмної моделі акселерометру. Моделювання динаміки чутливого елемента при різному русі основи.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Презентація,

тривимірна модель приладу 1 А1, плакати і схеми приладу та результати моделювання 3 А1.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка

Студент

(підпис)

Михайло ТІСТОЛ
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Олександр САПЕГІН
(ініціали, прізвище)

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ*

з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
	A4		Завдання на дипломний проект		
	A4	ДП ПГп71. 00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	15	
	A1	ДП ПГп71. 01.000 ТК	Тривимірна модель		
	A1	ДП ПГп71. 02.000 ТК	Збіркове креслення		
	A1	ДП ПГп71. 03.000 ТК	Чутливий елемент		
	A1	ДП ПГп71. 04.000 ТК	Імітаційна модель		

				ДП ПГп71 00.000.00		
	ПІБ	ідп.	ата			
Розробн.				Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.					1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. _____ Гр. _____	
Н/контр.						
Зав.каф.						

* Відомість виконується згідно зі Стандартом відповідної галузі економіки.

Анотація

В даному проекті розглянуто всі теоретичні питання щодо приладу, вибрана його конструктивна схема, проведені розрахунки основних конструктивних параметрів, створена тривимірна модель, створена імітаційна програмна модель. Пояснювальна записка складає 55 сторінки, в ній міститься 25 рисунків.

Анотация

В данном проекте рассмотрены все теоретические вопросы прибора, выбранная его конструктивная схема, проведены расчеты основных конструктивных параметров, создана трехмерная модель, создана имитационная программная модель. Пояснительная записка составляет 55 страницы, в ней содержится 25 рисунков.

Abstract

In the given project all theoretical questions concerning the device are considered, his constructive circuit is chosen the main structural parameters are calculated, a three-dimensional model is created, a simulation software model is created. The explanatory note consists of 55 pages, in it 25.

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту**

на тему: _____ Маятниковий мікромеханічний акселерометр _____

Київ – 20__ року

ЗМІСТ

ВСТУП	11
1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МІКРОМЕХАНІЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ	13
1.1 Особливості побудови ЧЕ мікромеханічних акселерометрів	13
1.2 Види мікромеханічних акселерометрів	14
1.3 Конструкція ММА	15
1.4 Області застосування ММА	22
1. Характеристики типових MEMS акселерометрів	24
2. ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ АКСЕЛЕРОМЕТРУ	27
2.1 Математична модель маятникового ММА	27
2.2 Проектування 3-D моделі акселерометра у середовищі SOLIDWORKS	28
2.3 Технологія виготовлення MEMS	34
2.4 Загальна характеристика технологічних процесів виготовлення MEMS акселерометрів	35
2.5 Імітаційне моделювання акселерометру	42
Висновок:	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	51
Додаток а	52

ВСТУП

В двадцятому столітті, коли розвиток техніки має надзвичайно високі темпи, з'явилась велика кількість технічних засобів, які дали поштовх до розвитку нових галузей промисловості, котрі змогли б мініатюризувати та покращити існуючу техніку. На сьогоднішній день можна сказати, що перспективним є розробка приладів, котрі мали б малу масу, не великі габарити, але хороші технічні характеристики, малу собівартість, високу надійність.

Мініатюризація навігаційних систем вимагає створення малогабаритних гіроскопічних датчиків. Пошук нових можливостей створення інерційних датчиків з необхідними характеристиками й прогрес в області мікроелектроніки привели до появи нового класу приладів - мікромеханічних акселерометрів (ММА). Поява мікромеханічних пристроїв, побудованих з використанням MEMS- технологій (MEMS – Micro Electromechanical Systems) ознаменувала революційні зміни в інерційній технології. В теперішній час питанню створення й використання ММА присвячена все більша увага розробників і споживачів малогабаритних датчиків параметрів руху.

Сучасні ММА значно поступаються по точності традиційним електромеханічним акселерометрам, але вони є кращими за масогабаритними характеристиками, показниками собівартості й енергоспоживання. Розроблені зразки ММА характеризуються надмалою масою (частки грамів) і габаритами (одиниці міліметрів), низькою собівартістю (десятки доларів на одну вісь вимірювання) і енергоспоживанням, високою стійкістю до механічних (ударні впливи до 105 g) і теплових впливів (від - 40°C до +85°C) і достатньою точністю.

Провідне положення в розробці ММА займає Draper Laboratory (США), що досліджує можливість створення мікромеханічних датчиків з початку 80-х років минулого століття. Різні технічні рішення в області розробок мікромеханічних інерційних датчиків отримані й запатентовані рядом

закордонних фірм (Rockwell International, Systron Donner, Analog Devices, Sagem, Murata та ін.).

Саме тому проектування сучасних мікромеханічних акселерометрів є актуальною задачею для приладобудування.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МІКРОМЕХАНІЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

1.1 Особливості побудови ЧЕ мікромеханічних акселерометрів

ЧЕ акселерометрів діляться на осьові та маятникові. Конструкція ЧЕ акселерометрів маятникового типу компанії Analog Devices. Маятник асиметрично підвішений на двох пружних балках. Принцип дії ЧЕ заснований на несиметричному підвісі рухомої рамки, завдяки чому здійснюється реєстрація сили прискорення, спрямованої перпендикулярно площині ЧЕ. Конструкція ЧЕ ММА характеризується наступними значеннями параметрів: розмір прапорця 5х3мм; зазор між фланком і ємнісним датчиком дорівнює 9.5 ± 1 мкм; ЧЕ має чотири симетричних упора по кутах маятника висотою 10 ± 1 мкм; розрахункова жорсткість пружних перемичок маятника забезпечує торкання упорів при дії лінійного прискорення величиною 2 g; датчик витримує удар величиною до 125 g. Чіп розміщується в герметичному стандартному металоскляному корпусі. Зниження тиску в корпусі дозволяє зменшити вплив газового демпфірування на чутливий елемент і добитись необхідних частотних властивостей мікроакселерометра [1].

В основі мікромеханічних акселерометрів лежить одно- або двокомпонентний підвіс(пружний), що поступово переміщується в площині підкладки чутливого елементу. Підвіс виготовлений методом поверхневої мікромеханічної обробки з полікремнію. В об'ємі кристала кремнію і в поверхневих полікремнієвих шарах крім ЧЕ розміщені підсилювачі сигналів з виходу первинного перетворювача інформації, аналогово-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі, демодулятор, джерело опорної напруги, схеми самодіагностики і термостабілізації параметрів [2]. В загальному структурна схема на рис.1.1.

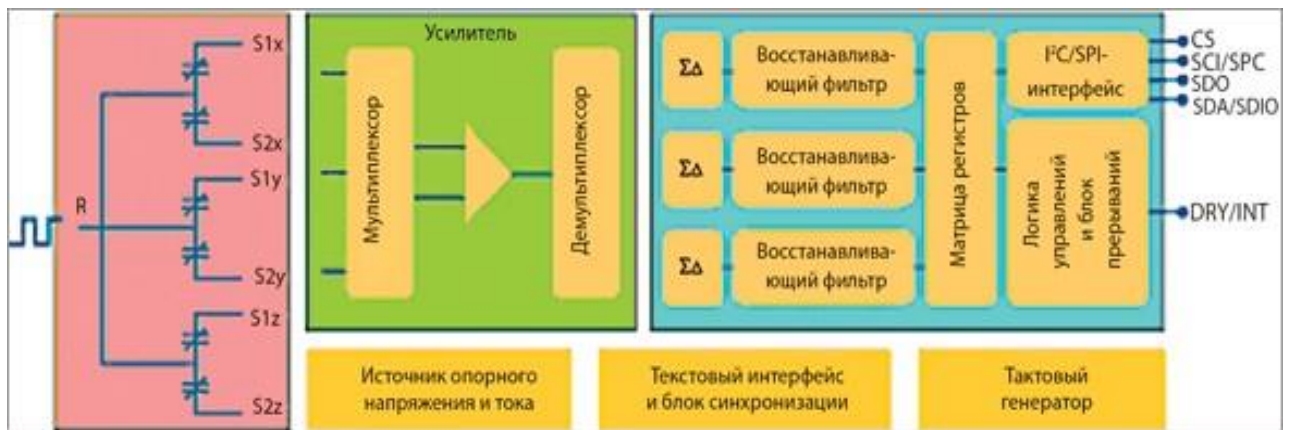


Рис. 1.1 Структурна схема акселерометру (тривісний, з цифровим вихідним сигналом)

1.2 Види мікромеханічних акселерометрів

Наразі існує багато видів акселерометрів: ємнісні, п'єзореzystивні, оптичні, п'єзоелектричні, струнні та ін. Всі вони відрізняються за такими параметрами, як чутливість, діапазон вимірювань, стійкість до впливу зовнішніх факторів, габарити, собівартість та ін.

Мікромеханічні акселерометри поділяються на види такі як показано на рис.1.2:

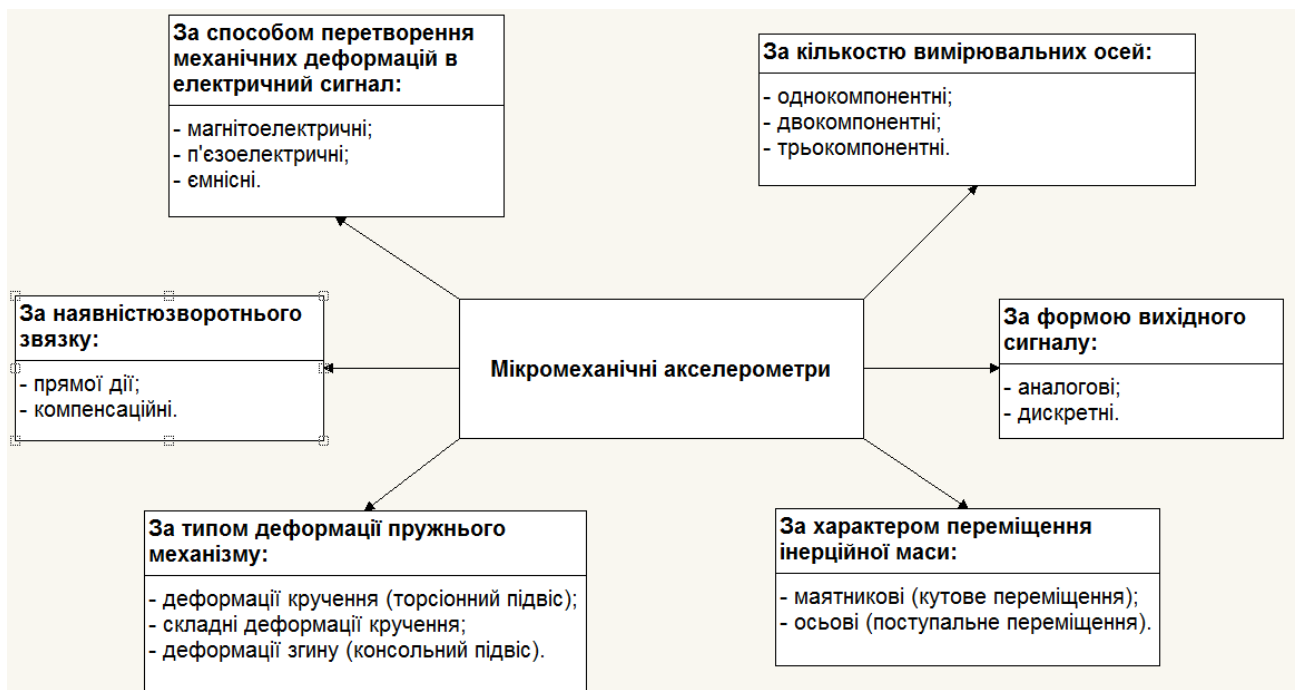


Рис. 1.2 Класифікація мікромеханічних акселерометрів

Основною класифікацією ММА по числу задіяних осей. Виходячи з цього можна виділити одноосьові, двоосьові, трьохосьові пристрої. В залежності від кількості осей акселерометр може задіяти більшу кількість координат для вимірювання прискорення. Також число осей називають числом компонентів.

За кількістю вимірювальних осей акселерометри поділяються:

- однокомпонентні;
- двокомпонентні;
- трьохкомпонентні.

Поділяються таж за принципом будови:

- механічні
- електромеханічні

За видом руху:

- лінійні (вимірюють лінійне прискорення, часто використовують щоб виміряти вібрації)
- кутові (вимірюють кутове прискорення, використовують як основу для гіроскопів).

1.3 Конструкція ММА

Однією з перших і найпростіших є конструкція інтегрального балочного акселерометра (рис.1.3). Конструкція чутливого елемента виконана анізотропним травленням монокристала кремнію в площині. Частина балки 4 є інерційною масою. Вона може бути з кремнію, або зроблена важчою за допомогою обкладки металом. Балка консоллю підвішена в кільцевій прямокутній рамці основи і відокремлена від нього П-образним проміжком 5. В консольній частини, яка деформується при прискореннях, сформовані тензорезистивні датчики деформації. Товщина пружної частини балки 10–20 мкм. Розміри кристала $5 \times 2,5 \times 0,3$. Чутливість лінійного акселерометра порядку 10^{-2} м/с². Діапазон вимірювання 0,1–500 м/с²; частотний діапазон 0–100 Гц. Рамка акселерометра захищена зверху і знизу скляними кришками.

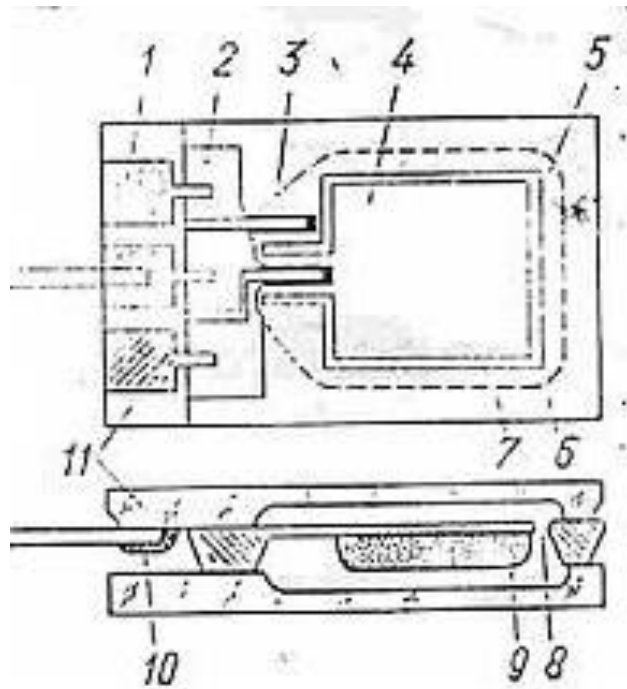


Рисунок 1.3 Конструкція інтегрального балочного акселерометра:

1 – контактні площадки; 2 – p^+ Область; 3 – p -область; 4 – балка; 5 – повітряний зазор; 6 – кремній; 7 – виїмка в кришці; 8 – повітряний проміжок; 9 – інерційна маса; 10 – струмопровідний клей; 11 – скляна кришка.

Часто застосовується підвіс маятника на двох пружних перемичках (торсіонах) (рис. 1.2).

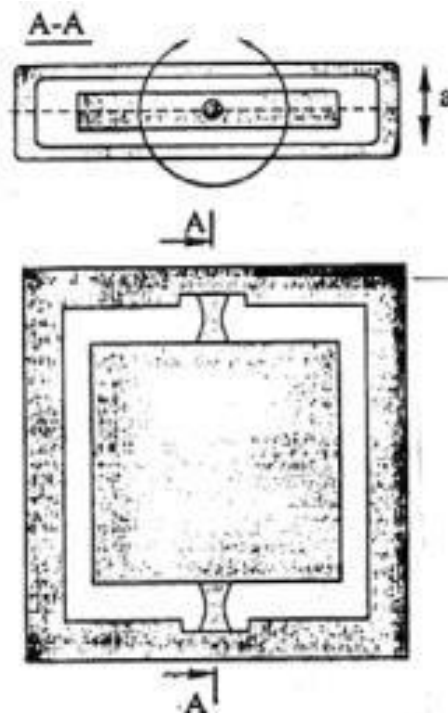


Рисунок 1.2 — Гібридний акселерометр компенсаційного типу

Так можуть виконуватися як кутові акселерометри, так і лінійні при зміщенні центру мас маятника щодо осі пружних перемичок. Тут зазвичай використовуються ємнісний датчик переміщень маятника, для чого на маятник і корпус приладу нанесені електроди (з зазором до 0,02 мм). При гібридному виконанні такий акселерометр має вбудований зворотній зв'язок (рис.1.3)

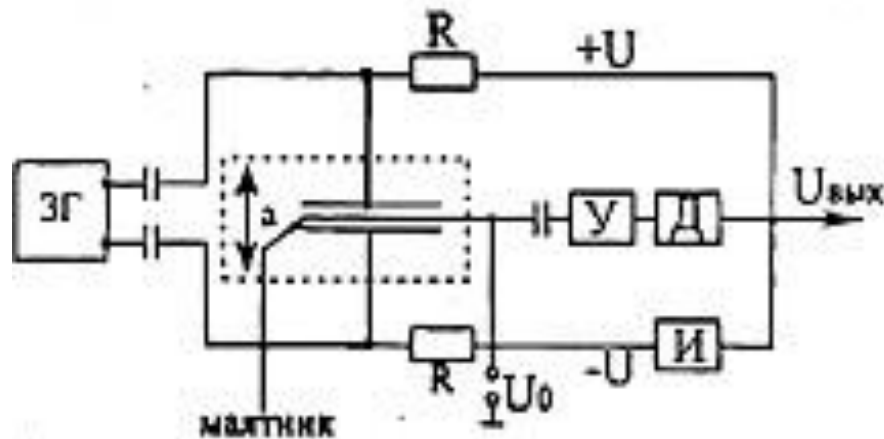


Рисунок 1.3 — Схема маятникового компенсаційного акселерометра з електростатичним зворотним зв'язком

Змінна напруга від генератора ЗГ подається в протифазі на нерухомі електроди датчика. Відхилення маятника модулює цей сигнал. Сигнал відхилення знімається з маятника і надходить через підсилювач У на демодулятор Д. Зворотній зв'язок подається з виходу на одну обкладку підвісу безпосередньо, а на іншу – через інвертор І. До маятника підключено також постійний зсув U_0 електричного підвісу.

Вимірювані прискорення до $\pm 35g$. Масштабний коефіцієнт $\sim 1,3$ мА/г.

Поріг чутливості $\sim 0,5$ μg . Дрейф нуля ~ 10 μg /час.

Нарешті, можлива підвіска інерційної маси на чотирьох пружних перемичках (рис. 1.4) (іноді вони попарно розташовуються на двох протилежних сторонах пластини, що несе інерційну масу).

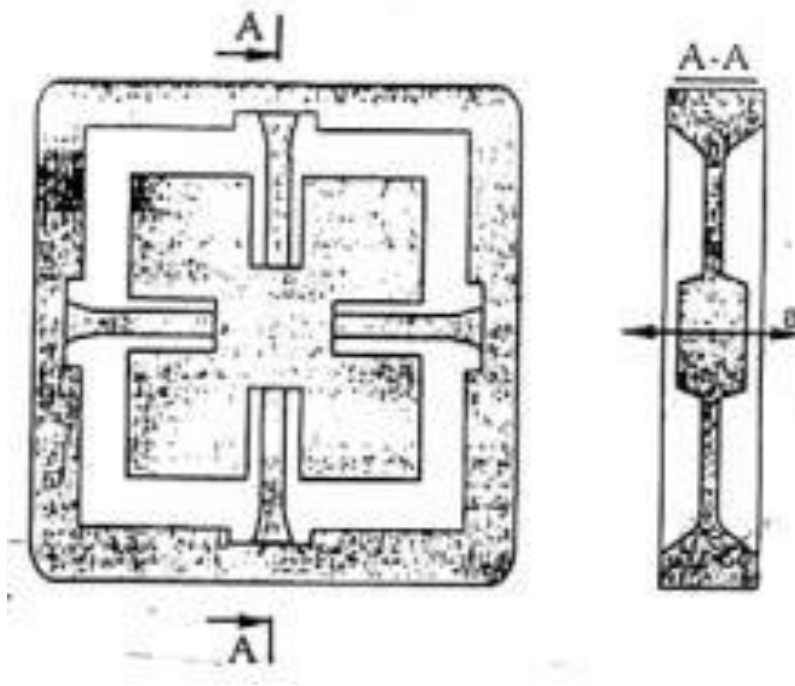


Рисунок 1.4 — Схема триосьового чутливого елемента

На цій підвісці можна зробити більш чутливі і точні прилади з дещо меншими межами вимірювання (до 5–10 g). Смуга — до 1000 Гц, точність — до 1% від максимального діапазону. Перетворює - як ємнісні, так і рідинні.

На подібному чутливому елементі роблять також мікромеханічні нахиломіри (рис. 1.5).

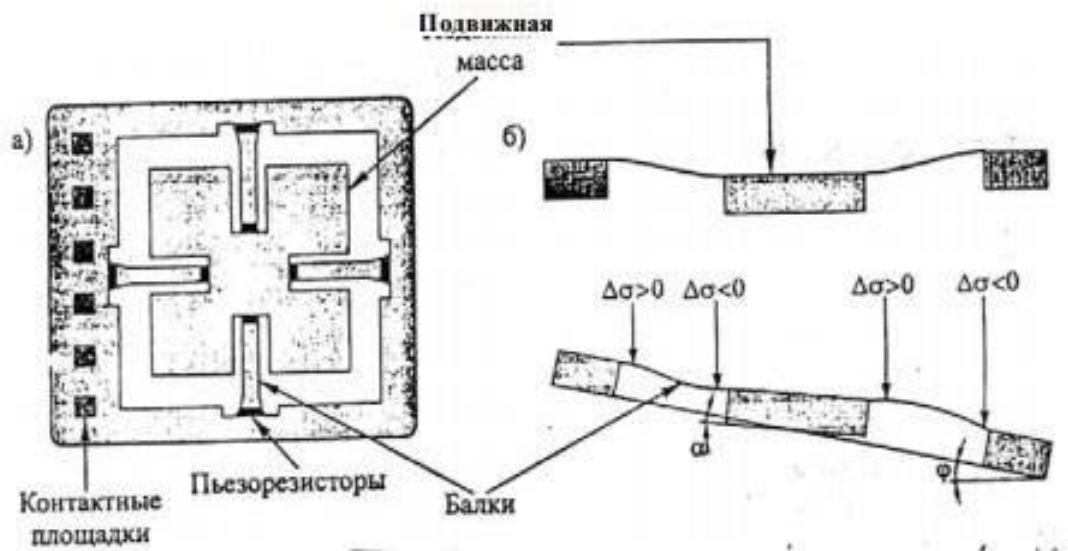


Рисунок 1.5 — Мікромеханічний нахиломір

Нахиломіри потрібні: на транспорті — автомобіль, залізничні вагони; оптичні інструменти; датчики рівня; для заміни ртутних вимикачів; в медицині (серцеві датчики та ін.).

Закріплення інерційної маси проводиться на тонких балках в межах проміжків рухомої маси. Балки виходять довгі (без збільшення габаритів чутливого елемента). Знімання інформації проводиться з допомогою тензорезисторів. Принцип роботи ясний з малюнка: нахил датчика викликає S-образні викривлення балок. Інформація про кути нахилу балок може бути залучена з сигналів двох сенсорів, датчики яких розташовані в двох взаємно перпендикулярних площинах. Розміри пристрою конкретної реалізації: рухома маса 5×5 мм, довжина пружної балки 510 мкм, ширина 7 мкм, товщина 5 мкм, повний діапазон вимірюваних кутів $\pm 80^\circ$, чутливість ~ 1 мВ / градус нахилу [4].

Крім балочних є ще й тензорезисторні (п'єзорезистивні) акселерометри (рис.1.6).

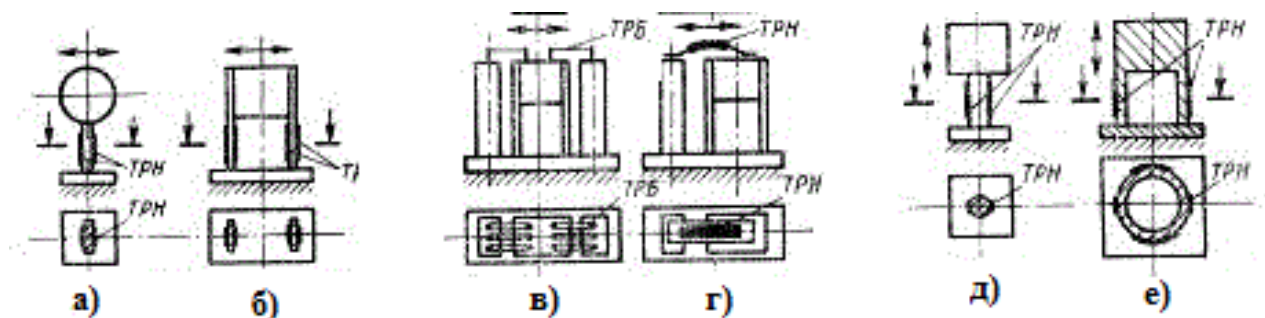


Рисунок 1.6 — Основні схеми тензорезисторних акселерометрів

Найпростіший акселерометр (рис.1.8, а) складається з основи, консольного чутливого елемента з тензорезисторами та інерційною масою на кінці. Розрахунок такого акселерометра зводиться до визначення перерізу та прольоту консольної балки на дію сили, рівної добутку маси на вимірюване прискорення. Акселерометри такого типу використовують для вимірювання прискорень в діапазонах від 0–20g до 0–20000g при частотному діапазоні вимірювань від 0...15 до 1500 Гц. Власна частота акселерометрів консольного типу визначається жорсткістю консолі та інерційною масою. Частотний діапазон може бути розширений застосуванням пружних елементів без

сконцентрованої маси. Сила, що діє на такий акселерометр, визначається добутком вимірюваного прискорення на погонну масу консолі.

Акселерометр, зображений на рис.1.8, б відрізняється тим, що має рамний чутливий елемент з інерційною масою, закріпленою між двома консольними балками. В порівнянні з акселерометрами консольного типу в цьому випадку може бути досягнений більш високий коефіцієнт перетворення при тих же власних частотах. Рамний елемент розраховують з урахуванням жорсткого закладення стійок з обох кінців. Акселерометри цього типу дозволяють виміряти прискорення безпосередньо через маленькі переміщення інерційної маси за допомогою перетворювачів переміщень (рис. 1.8, в). У акселерометрів з безосновними тензорезисторами найбільш високий коефіцієнт перетворень, але обмежений амплітудний діапазон. Їх використовують для вимірювань малих прискорень (порядку декількох g) при частотах 0...25Гц.

Низькочастотні акселерометри зазвичай мають демпфування за допомогою рідини, для чого чутливий елемент розташовують в герметичному корпусі, залитим, наприклад, полісилоксановою рідиною.

Високочастотні акселерометри виконують за схемами, приведеними на рис.1.8, д та рис.1.8, е. Вони мають інерційну масу, що пов'язана з основою через силовимірювач суцільного або трубчастого перерізу. Акселерометр орієнтують так, щоб вимірюване прискорення діяло вздовж вісі чутливого елемента. Розрахунок такого акселерометру зводиться до визначення розмірів силовимірювача, що навантажений силою, рівною добутку прискорення на масу [5].

Є і більш екзотичний тип MEMC-акселерометрів — термальні датчики прискорення. В них в якості основного об'єкта використовується гарячий пухирець повітря. Датчик складається з пластини, що примикає до герметичної порожнини, заповненої газом. В пластині витравлені поглиблення. У центрі кремнієвої пластини над поглибленням підвішений нагрівач. На пластині встановлені чотири датчика температури: термоелементи (ТЕ) з алюмінію і полікремнію. ТЕ розташовані на однаковій відстані з чотирьох сторін від нагрівача (дві осі). В даному випадку ТЕ використовуються замість термопар з

єдиною метою: збільшити електричний вихідний сигнал. Інша пара ТЕ застосовується для визначення градієнта температур уздовж осі у.

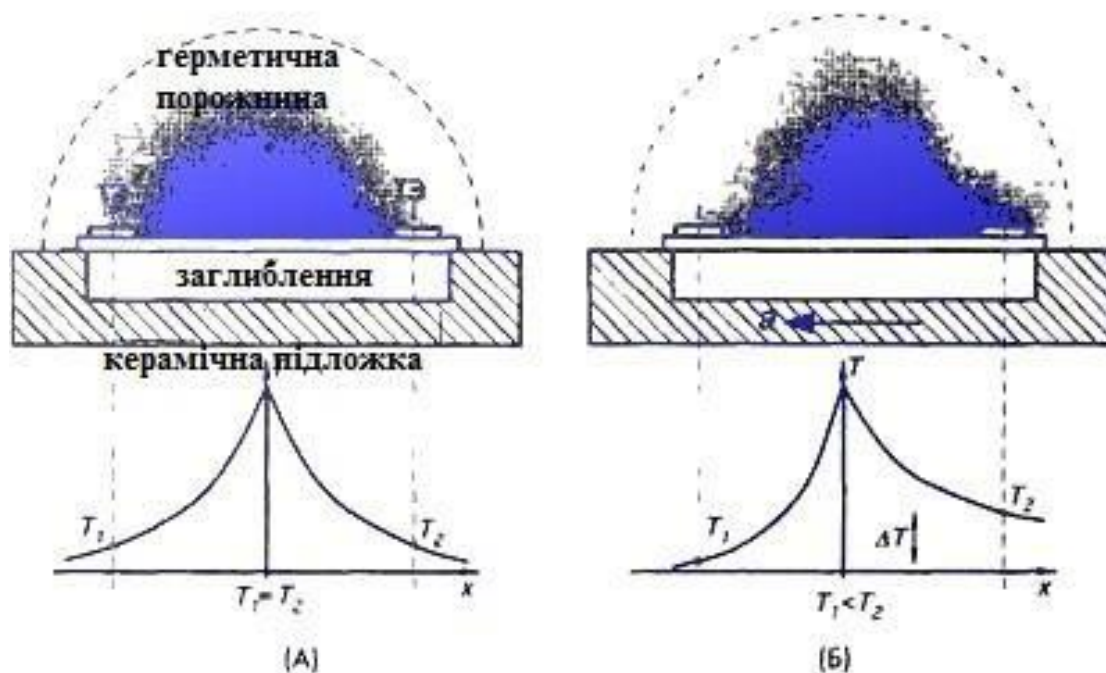


Рисунок 1.7 — Поперечний переріз акселерометру уздовж осі x: а) нагрітий газ розташовується симетрично навколо нагрівача, б) прискорення змушує нагрітий газ зміщуватися вправо, що призводить до перепаду температур.

Він виготовлений на КМОП кристалі і є двовісним вимірювачем прискорень. Головною перевагою є високий рівень допустимих перевантажень (до 50 000g), що значно підвищує їх надійність.

На рис.1.9, а відображені два ТЕ, що вимірюють градієнт температури вздовж осі x. З малюнка видно, що найбільша температура газу спостерігається поруч з нагрівачем, і вона досить різко падає ближче до країв, де розташовані ТЕ. Коли на газ не діють ніякі сили, температура має конусоподібний розподіл навколо нагрівача, при цьому температура лівого ТЕ T_1 дорівнює температурі T_2 правого ТЕ. Прискорення акселерометра в будь-якому з напрямів через конвекційну теплопередачу змінить температурний профіль, який стане несиметричним. На рис. 3.7, б відображено, як зміниться температурний профіль при прискоренні a , напрямом якого вказано стрілкою. Під дією

прискорення теплі молекули газу зміщуються до правого ТЕ, передаючи йому частину своєї енергії. В результаті цього температури, а, отже, і вихідні напруги правого і лівого ТЕ перестануть бути рівними ($T_1 < T_2$). Різниця температур ΔT , а значить, і напруга між виходами ТЕ прямо пропорційна прискоренню. У даній конструкції існує два ідентичних вимірювальних канали, що дозволяють визначати прискорення вздовж осі x і осі y [6].

В рамках дипломної роботи (оскільки немає необхідності досліджувати великі перевантаження) найбільш цікавими є лінійні акселерометри балочного типу з вимірюваним прискорення до 20g.

1.4 Области застосування ММА

Після істотного зниження габаритних, вартісних й енергетичних характеристик відкриває нові шляхи використання ММА в цивільній і військовій областях, де раніше їхнє застосування було неможливо через габаритні обмеження або стримувалося через економічні міркування.

Найбільш привабливим для розробників є потенційний ринок комерційного цивільного використання датчиків, що на порядки перевищує обсяги можливого ринку військової техніки. Серед можливих областей застосування ММА в якості датчиків параметрів руху можна назвати наступні:

1. Автомобільна промисловість. Індустрія автомобільної промисловості є основним «двигуном» швидкого розвитку ринку ММА. У наш час в автомобілях використовуються від 40 до 80 датчиків для створити різні системи безпеки та навігації. Протягом найближчих років число датчиків буде подвоєно і всі останні моделі автомобілів таких, як BMW, Volkswagen й Mercedes будуть забезпечуватися системами навігації й динамічного контролю безпеки.

Автомобільна сфера застосування акселерометрів сконцентрована в області систем безпеки, комфорту пасажирів, динамічного контролю руху автомобіля та включає наступні області завдань:

- виявлення аварії;
- активація систем безпеки і контроль розгортання подушок безпеки;

- детектування крену, бічних аварій і перекидань;
- аварійні випробування;
- адаптивний круїз-контроль, контроль зчеплення, контроль динамічної стабільності;
- контроль активної (або напів-активної) підвіски, системи транспортної навігації;
- контроль нерівності дороги.

2. Товари широкого вжитку. ММА можуть знайти застосування для стабілізації зображення відеокамер, для створення систем індивідуальної навігації, у нових розробках віртуальних комп'ютерних ігор і спортивного спорядження.

3. Медицина. Мікрогіроскопи можуть бути використані для стабілізації мікроінструментів, у медичній електроніці й діагностичній апаратурі.

4. Робототехніка. Серед можливих застосувань - задачі навігації мобільних роботів, керування маніпуляторами різного призначення, автоматизація заводського устаткування.

5. Спостереження за сейсмічною активністю. Збільшення терміну служби будівельних споруд, а також підвищення умов безпеки життєдіяльності є на сьогоднішній день світовою тенденцією. У даному напрямку величезну роль грає розвиток систем безпеки і безперервного моніторингу будівель, мостів, залізничних колій. МЕМС – сейсмо-датчики застосовуються за кордоном в якості систем охорони залізничного полотна. На заміну типовому патрулюванню приходять інтелектуальні системи моніторингу.

6. Навігаційне устаткування й військова техніка. Досягнення в області створення без карданових інерційних навігаційних систем і комплексування із глобальними супутниковими навігаційними системами дозволяють застосовувати ММА для широкого класу завдань навігації й керування рухом. Завдяки своїм унікальним властивостям ММА знаходять застосування в системах озброєнь і військової техніки, можуть бути успішно використані для стабілізації супутникових антен, керування безпілотними літальними апаратами й іншою апаратурою рухомих об'єктів[2].

7. Авіація. При виконанні літаками крутих віражів і фігур вищого пілотажу виникають відцентрові сили, що діють на всі частини літака. Ці сили залежать від кутової швидкості обертання літака. Відцентрову силу, що діє на будь-яку частину літака, можна скласти за правилом паралелограма з силою тяжіння. Відношення результуючої сили до сили тяжіння називається перевантаженням і характеризує збільшення напруги в матеріалі в порівнянні з нормальним польотом, коли діє тільки сила тяжіння. У цих задачах мікромеханічний акселерометр необхідний для визначення в польоті величини перевантаження уздовж вертикальної осі літака, що виникають при виконанні літаком еволюції[3].

Широке застосування ММА стимулюють подальший розвиток даного типу інерційних датчиків та зростання потреби в них. Сфера застосування розширюється вдосконалюючи їх характеристики.

1.Характеристики типових МЕМС акселерометрів

На сьогоднішній день на ринку МЕМС акселерометрів найбільшими виробниками є такі компанії: STMicroelectronics, Freescale и Analog Devices. Найбільш поширенішими є двокомпонентні та трьохкомпонентні акселерометри. Одноосьові акселерометри на сьогодні вже не актуальні тому не виробляються.

Для порівняння в табл.1 представлено деякі параметри найбільш розповсюджених акселерометрів.

Таблиця 1 — Параметри акселерометрів відомих виробників

Тип	Виробник	Напруга живлення, В	Максимальне прискорення	Діапазон температур, °С	Споживання струму, µА
2-осьові	Analog Devices	3-6	1,7g*	-40...+125	Типовий 500
	SovTest	1-5	30g	-40...+85	1...100
	Bosh	4,75-5,25	55g	-65...+10	5...200
3-осьові	STM	2,4-3,6	2g, 6g	-40...+85	1...350
	RoHS	1,6-3,6	2g, 3g, 16g	-40...+85	6...165
	Analog Devices	2,0-3,6	20g	-40...+85	0,1...140

* зазвичай прискорення позначається у відносних величинах (відносно прискорення вільного падіння $g = 9,8 \text{ м/с}^2$)

На прикладі акселерометрів виробництва STMicroelectronics розглянемо основні параметри/властивості притаманні різним видам акселерометрів.

Аналогові акселерометри:

Межі вимірів прискорень: $\pm 2g / \pm 6g$;

Струм споживання в нормальному режимі менше 0,5 мА;

Струм споживання в сплячому режимі менше 1 мкА;

Смуга пропускання до 3 кГц;

Дозвіл краще ніж 0,5 Mg при 100 Гц;

Дуже висока температурна стабільність: $0,2 \text{ Mg} / ^\circ \text{C}$;

Розширений діапазон робочих температур: $-40 ^\circ \text{C} \dots + 85 ^\circ \text{C}$;

Вбудована функція само тестування;

Висока стійкість до ударів 10000g при 0,1 мс. Цифрові акселерометри:

Цифрові SPI і ІС інтерфейси;

Межі вимірів прискорень: $\pm 2g / \pm 4g / \pm 8g$;

Струм споживання в нормальному режимі менше 0,3 мА;

Струм споживання в економічному режимі менше 10 мкА;

Струм споживання в сплячому режимі менше 1 мкА;

Роздільна здатність краще ніж 1 mg;

Дуже висока температурна стабільність: $0,2 \text{ mg} / ^\circ \text{C}$;

Розширений діапазон робочих температур: $-40 ^\circ \text{C} \dots + 85 ^\circ \text{C}$;

Вбудована функція само тестування;

Висока стійкість до ударів 10000g при 0,1 мс. Інтелектуальні вбудовані функції:

Незалежні повністю програмовані сигнали переривань;

Розширені функції «вільне падіння» і «пробудження»;

Функція розпізнавання однократного натискання і подвійного натискання (click and double click);

Функція «прямого розпізнавання»;

Функція пробудження;

Вбудований високочастотний фільтр.

2. ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ АКСЕЛЕРОМЕТРУ

2.1 Математична модель маятнікового ММА

Принципові схеми чутливих елементів маятнікових акселерометрів представлені на рис.2.1.

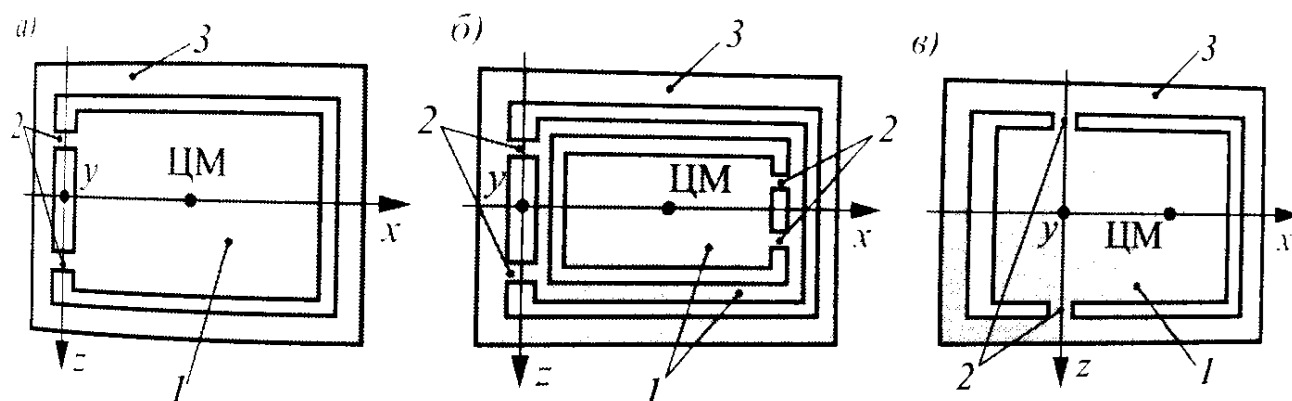


Рис.2.1. Принципові схеми ЧЕ маятнікових акселерометрів

Тут позначено 1 – інерційна маса, 2 – пружні елементи підвісу, 3 – опорна рамка.

Пружні елементи підвісу акселерометра, зображеного на рис.2.1 а подібні балкам, що працюють на згин. Схема ЧЕ за рис.4.1 б являється подвійним маятником. ІМ одного з них має форму пластини, а іншого – рамки. Пружні елементи ідентичні рис. 2.1 а. Така схема не набула комерційного застосування. У схемі ЧЕ за рис.2.1 в пружні елементи аналогічні балкам, що працюють на кручення. Такі елементи прийнято називати торсіонами.

Маятниковість ІМ обумовлена не співпадінням їх центрів мас з теоретичними осями підвісу z . У подвійному маятнику центри мас можуть не співпадати і бути рознесеними по осі x . Вісь чутливості для кожної схеми ЧЕ по рис.2.1 перпендикулярна площині пластини, тобто співпадає з віссю y .

Рівняння руху ІМ маятнікового акселерометра по структурі ідентичні рівнянню руху осьових мікроакселерометрів. Для схеми рис. 2.1 в рівняння руху буде мати наступний вигляд

$$J_z \ddot{\varphi} + f_{\varphi} \dot{\varphi} + G\varphi = ma_y l; \quad (2.1)$$

де позначено J_z – момент інерції ІМ відносно осі коливань z ;

f_{φ} – коефіцієнт демпфування по кутовій координаті;

G – жорсткість;

l – відстань від центру мас до осі z ,

φ – кут повороту ІМ навколо осі z ;

m – маса ІМ.

Для усталеного режиму ($\dot{\varphi} = \ddot{\varphi} = 0$) відбувається кутове зміщення пластини ІМ на кут який несе інформацію про діюче прискорення.

$$\varphi = \frac{ma_y l}{c_{кр}} \quad (2.2)$$

Вимірювання переміщень ІМ аналогічні осьовим мікроакселерометрам і здійснюються ємкісними, п'єзореzystивними, або перетворювачами іншого типу. П'єзореzystивні перетворювачі розміщуються на балках або торсіонах в місцях, де виникає найбільше напруження [5].

2.2 Проектування 3-D моделі акселерометра у середовищі SOLIDWORKS

У якості конструктивної схеми було обрано акселерометр, представлений на рис.2.30 у роботі [4].

Акселерометр складається з двох основних елементів: чутливого елемента та основи. Спираючись на зображення мікромеханічних акселерометрів у різних джерелах було побудовано основні деталі приладу.

Тривимірна модель акселерометра, побудована середовищі SOLIDWORKS представлена на рис. 2.2.

Модель будувалася, як збірка із окремих елементів акселерометра, що представлені на рас. 2.3 – 2.4.

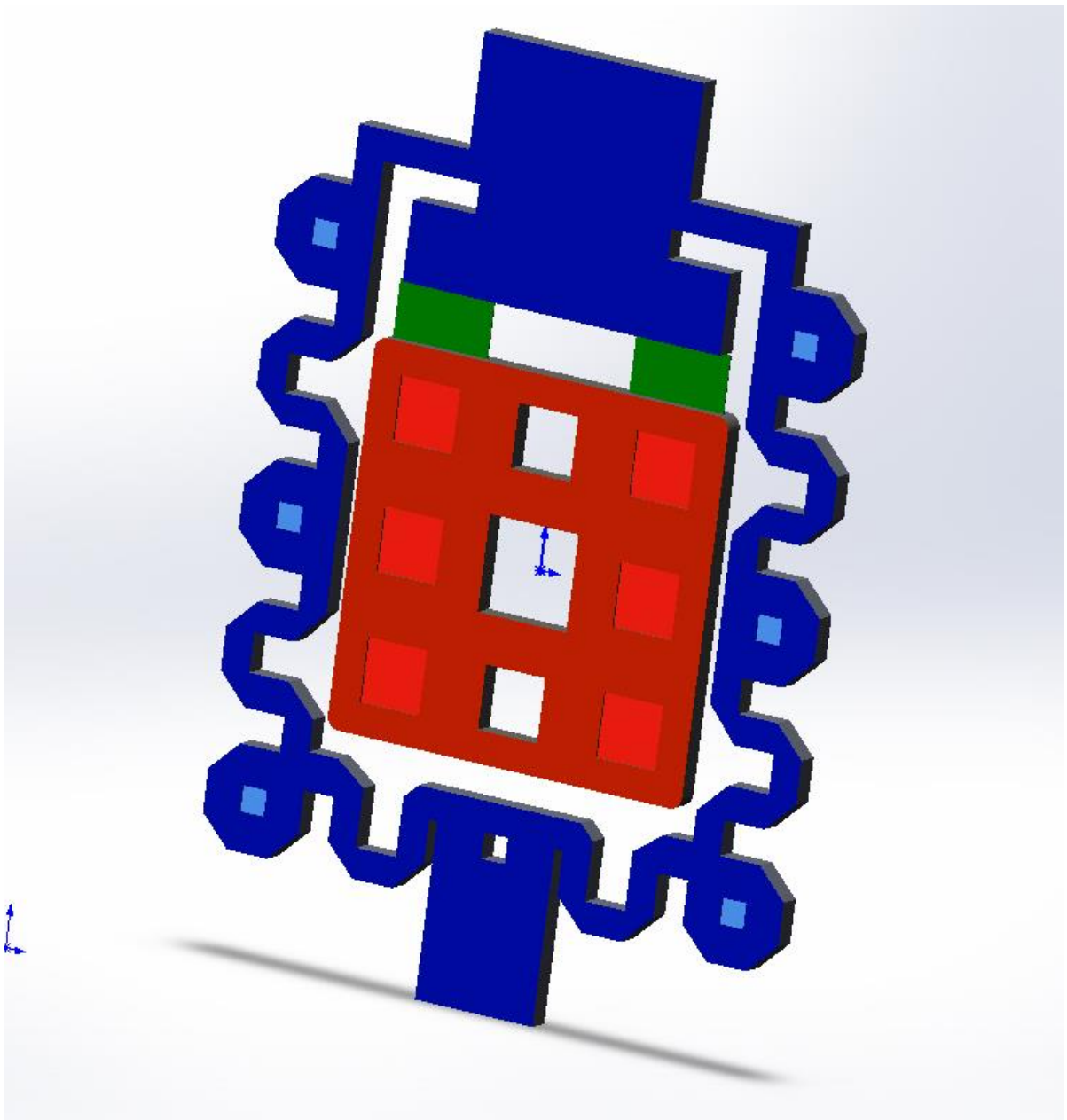


Рис. 2.2 Тривимірна модель маятнікового акселерометра

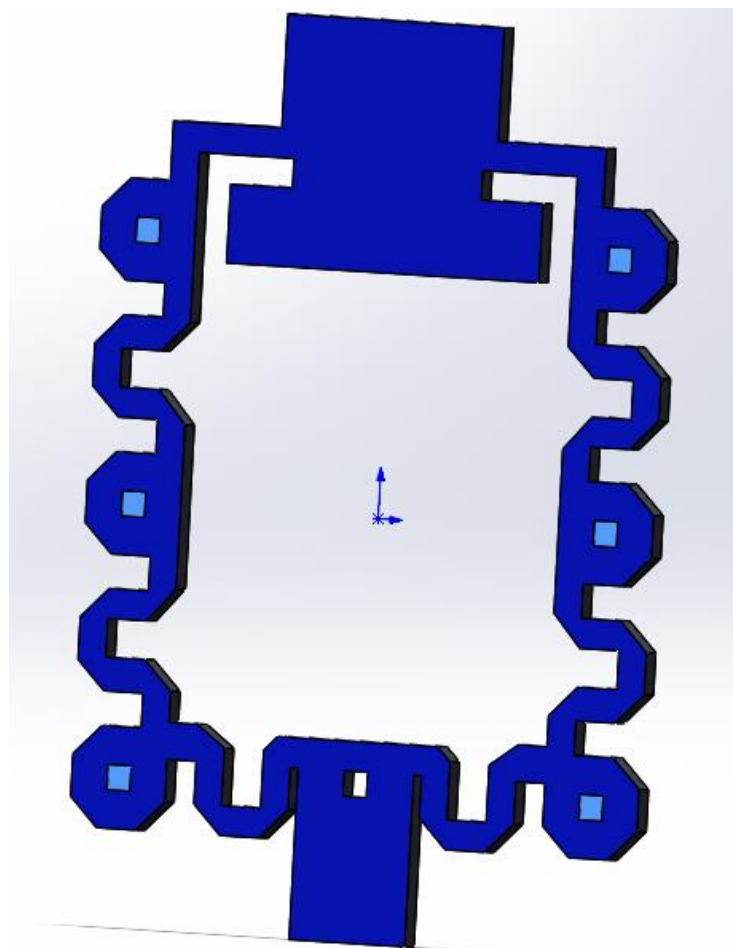


Рис. 2.4. Основа ММА

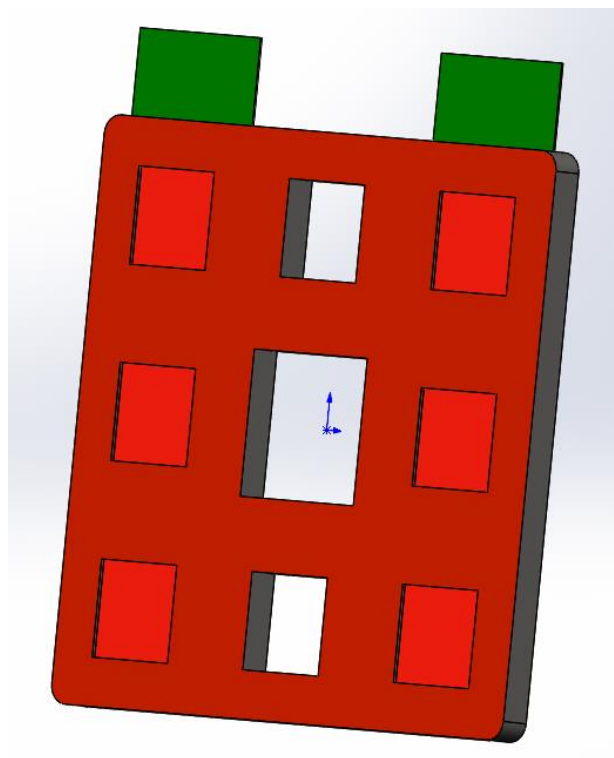


Рис. 2.5 Інерційна маса

Розрахуємо основні конструктивні параметри акселерометра, використовуючи створену тривимірну модель.

Максимальне відхилення інерційної маси становить $\varphi = 0.16^\circ$.

Акселерометр виготовлено із Кремнію, тому задавши цей матеріал у середовищі SolidWorks можна визначити масу інерційної маси та момент інерції відносно осі підвісу:

$$m = 8.2 \cdot 10^{-5} \text{ кг},$$

$$J_c = \frac{2,6 \cdot 10^{-5}}{12} (3,6 \cdot 10^{-6} + (360 \cdot 10^{-6})^2) = 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot (36 \cdot 10^{-6} + 129600 \cdot 10^{-12}) = \\ = 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot (36 \cdot 10^{-6} + 0,13 \cdot 10^{-6}) = 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 36,13 \cdot 10^{-6} = 8,2 \cdot 10^{-5}$$

Пружні елементи маятникових акселерометрів відчують ті самі навантаження, що й осьові, тому коефіцієнти жорсткості визначаються за формулами (2.3). Якщо центр мас і геометричний центр пластини співпадають і сила, прикладена по осі у до центр мас, то жорсткість підвісу визначається по формулі:

$$G = 2k_{11} = (24EI) / l^3 \quad (2.3)$$

де E – модуль пружності, I – момент інерції балки, l – довжина балки.

На рис.2.6 представлено елемент підвісу інерційної маси акселерометру з його розмірами.

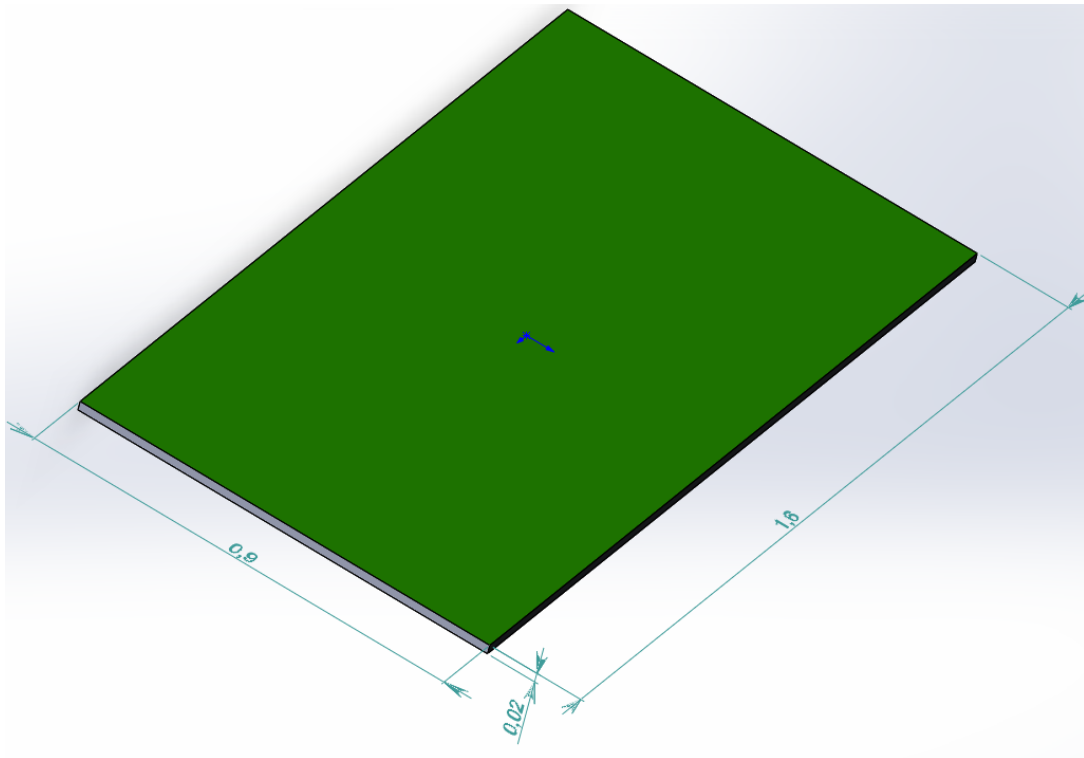


Рис.2.6 Балка підвісу

Момент інерції ІМ однієї балки розраховується за наступною формулою:

$$J_{\text{балки}} = \frac{1}{12} b_n c_n^3 \quad (2.4)$$

Оскільки акселерометр виготовлено з Кремнію, відомі його геометричні розміри, ми можемо розрахувати жорсткість підвісу за (2.3), використовуючи (2.4).

$$J_{\text{балки}} = \frac{1}{12} \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} (0,02 \cdot 10^{-3})^3 = 2,7 \cdot 10^{-4} \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-9} = 10,8 \cdot 10^{-19} \text{ Нм}^2$$

$$G = 2 \cdot \frac{12 \cdot 1,295 \cdot 10^{11} \cdot 10,8 \cdot 10^{-19}}{(0,9 \cdot 10^{-3})^3} = 447,65 \cdot 10^1 = 4476,5 \text{ Н / м}$$

Коефіцієнти демпфування для рухомих вузлів, що мають форму квадрата ($a_m = b_m$), визначаються по формулі:

$$k_{\text{ду}} = \frac{\mu a_m^6}{4h_0^3} - \frac{\mu a_1^6}{4h_0^3} - \frac{2\mu a_2^6}{4h_0^3} = \frac{\mu a_m^6}{h_0^3} (a_m^6 - a_1^6 - 2a_2^6) \quad (2.4)$$

де позначено μ – коефіцієнт динамічної в'язкості; h_0 – величина зазору між ЧЕ та корпусом приладу; a_m – ширина та висота інерційної маси; a_1 та a_2 – розміри вентиляційних отворів на інерційній масі.

Відповідні геометричні розміри видно з рис.2.7

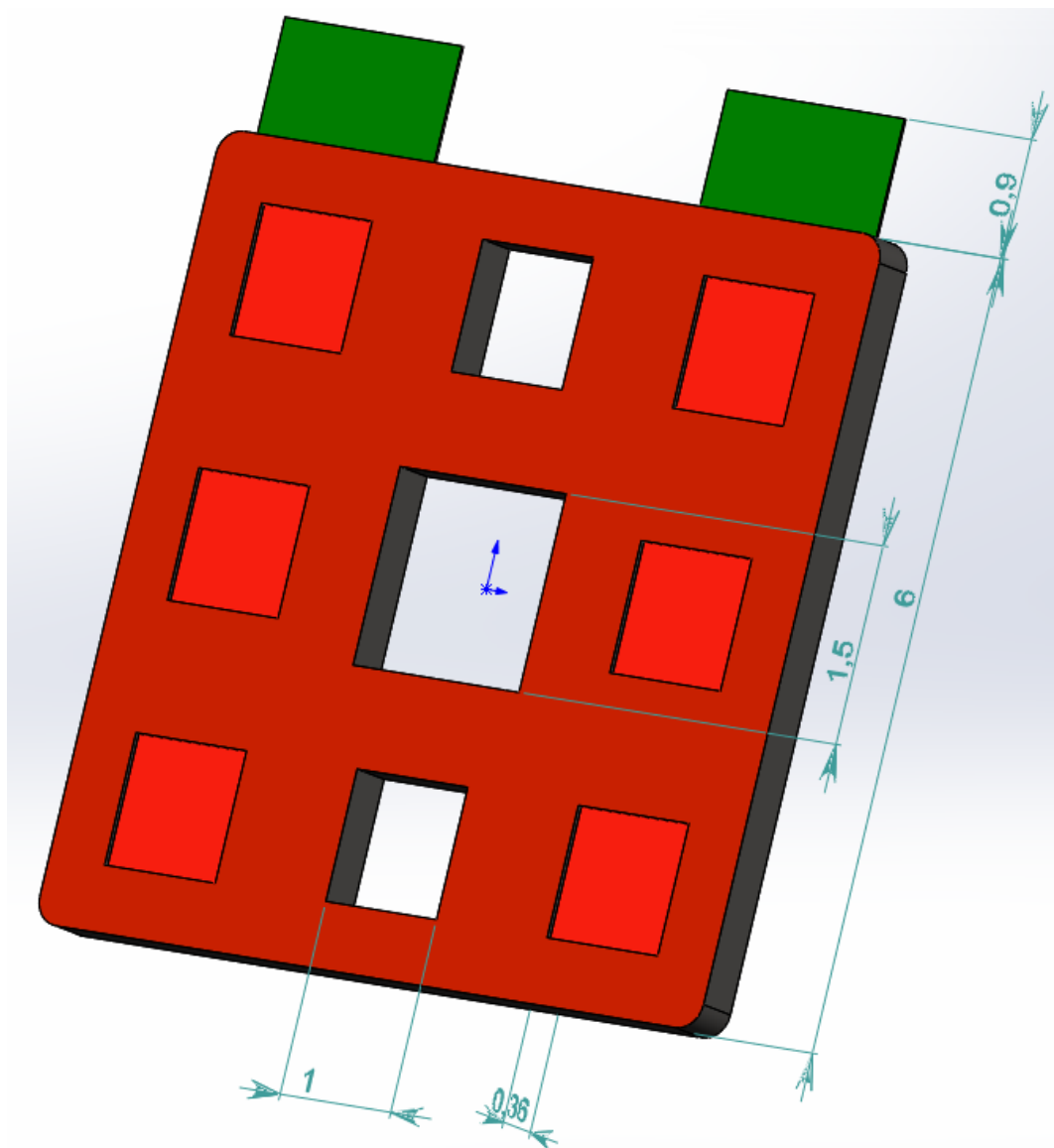


Рис.2.7 Інерційна маса

Враховуючи коефіцієнт динамічної в'язкості повітря
 $\mu = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}$ розрахуємо демпфування чутливого елементу
 акселерометру

$$k_{\text{ду}} = \frac{1,7 \cdot 10^{-5}}{4 \cdot (10^{-6})^3} \cdot ((6 \cdot 10^{-3})^6 - (1,5 \cdot 10^{-3})^6 - 2 \cdot (1 \cdot 10^{-3})^6) =$$

$$= 0,43 \cdot 10^{13} \cdot (46656 - 11,39 - 2) \cdot 10^{-18} = 20056,3 \cdot 10^{-5} = 2.$$

2.3 Технологія виготовлення МЕМС

Для виготовлення МЕМС застосовують методи виробництва розроблені для промисловості інтегральних схем (ІС), з метою формування механічних елементів типу балок, діафрагм і пружин на кристалі або підкладці.

Існує три характерні особливості технологій виготовлення МЕМС - мініатюризація, множинність, і мікроелектроніка.

Мініатюризація дозволяє виробництво компактних, швидкодіючих пристроїв.

Множинність відноситься до групового виготовлення, яке властиво обробці напівпровідника, це дозволяє легко і одночасно виготовити тисячі або мільйони компонентів на одній підкладці.

Мікроелектроніка - інтелект МЕМС, вона дозволяє монолітне злиття датчиків, приводів, ЧЕ і тракту обробки інформації. Мікро-виготовлення забезпечує потужний інструмент для групової обробки і мініатюризації механічних систем в розмірну область, не доступну звичайними методами механічної обробки. Крім того, мікро-виготовлення забезпечує можливість інтеграції механічних систем з електронікою. МЕМС технологія пере розбіжності між складними механічними системами й електронікою інтегральних схем. Історично, датчики і приводи - найдорожча і складна частина макромасштабних систем електроніки. МЕМС технологія дозволяє виготовляти ці складні електромеханічні системи. Використання методів групового виготовлення, зменшує вартість і збільшує надійність цих систем, датчиків і приводів, зрівнює їх з інтегральними схемами.

Найбільш важливі частини технології були прийняті від технології ІС. Наприклад, майже всі пристрої базуються на пластинах кремнію та їх структури реалізуються в тонких плівках, використовуються фотолитографіческие методи, подібно ІС. Однак існують технологічні процеси, які не є розвитком технологій ІС, і оскільки технологія продовжує розвиватися, відрив від технології ІС також зростає.

Виділяють три основних стандартних будівельних блоку технологією МЕМС [8]:

- здатність депонувати тонкі плівки матеріалу на підкладку;
- копіювати образи на вершини плівок літографічним відображенням;
- трюїти плівки вибірково до образів.

Для формування необхідної конструкції та пристрої, використовується технологічний процес МЕМС, який являє собою структуровану послідовність цих дій.

2.4 Загальна характеристика технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів.

При виготовленні чутливих елементів, які є основою будь-якого приладу, вони представляються у вигляді шаруватих структур з різних матеріалів. При їх виборі необхідно враховувати наступні фактори: сумісність кристалічних решіток; узгодження температурних коефіцієнтів лінійного розширення; облік допустимої теплової навантаження, а для напівпровідникових матеріалів — температуру переходу в стан, при якому концентрація власних носіїв заряду близька до домішкової. При виборі матеріалів необхідно керуватися і традиційними вимогами: електрична і механічна міцність, висока тепло - і електропровідність, стійкість до зовнішніх впливів.

Основним серед конструкційних матеріалів для виготовлення чутливих елементів акселерометрів, гіроскопів, датчиків тиску є кремній, володіє такою важливою властивістю, як можливість отримання в окислювальному середовищі тонкого, міцного і вологонепроникного шару аморфного двоокису кремнію (SiO_2) на поверхні кристалічного кремнію. Плівка двоокису кремнію відіграє важливу роль, оскільки може бути використана як для захисного покриття поверхні кремнію, так і для діелектричної ізоляції схемних елементів.

Окислення кремнієвої пластини. Шар двоокису кремнію формується звичайно на підкладці за рахунок хімічної сполуки в напівпровіднику атомів кремнію з киснем, який подається до поверхні кремнієвої підкладки, нагрітої в

технічній печі до високої температури (рис. 2.8). Пластини розміщуються в кварцовою трубці діаметром 120-130 мм. Окислення відбувається близько 6 годин в залежності від товщини оксиду (SiO_2) і способу окиснення[9].

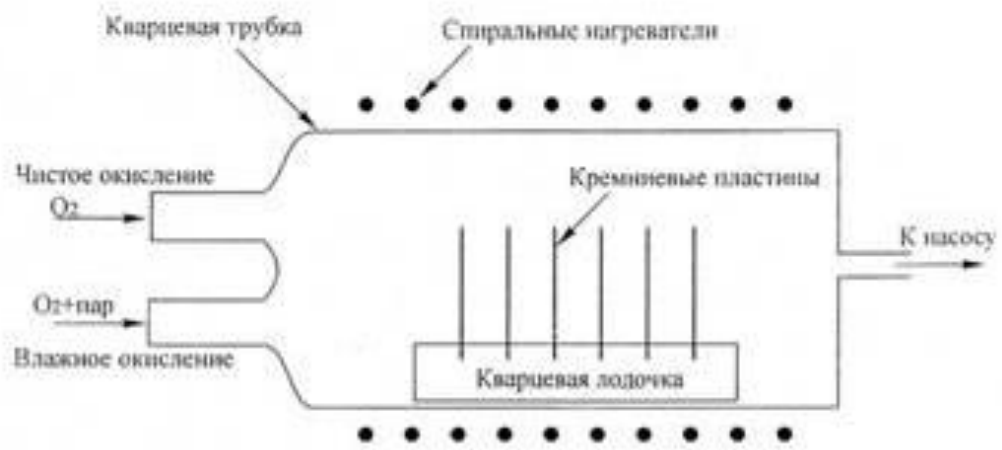


Рис.2.8 Термічне окислення

Окислення відбувається набагато швидше в атмосфері вологого кисню, тому вологе окислення використовується для утворення більш товстих захисних шарів.

Найбільш часто використовується товщина оксиду, складова десяти частки мікрона, а верхній практичний межа по товщині для звичайного термічного окислення становить 1-2 мкм.

Літографія. Розмірна обробка пластин виконується з допомогою травлення, вибірковість якого забезпечується розкриттям «вікон» в захисної оксидної плівки. Цей процес називається літографією. Літографічні процеси формують на поверхні підкладки шари стійкого до наступних технологічних впливів матеріалу, здатного під дією опромінення певної хвилі змінювати необоротно свої властивості і, насамперед, стійкість до проявителям. Резистивний шар, локально опромінений з допомогою шаблону, обробляють проявителем, де в результаті видалення локальних ділянок отримують резистивну маску.

В залежності від довжини хвилі застосовуваного випромінювання застосовують наступні види літографії: фотолітографію (оптичну літографію), електронно-променеву, рентгенівську та іонно-променеву [9,10,11].

Фотолітографія є основним технологічним процесом в мікроелектронному виробництві; зазвичай він застосовується для отримання ліній шириною до 2-3 мкм. Для виготовлення масок в даний час також використовується електронно-променева літографія. З-за ефекту зворотного розсіювання відбитих електронів в мікроструктурах з високою щільністю мінімальна ширина лінії обмежується величиною близько 0,5 мкм. Рентгенівська літографія дозволяє зменшити лінійні розміри до декількох десятків нанометрів; при цьому, однак, потрібно використовувати складну поглинаючу маску або спеціальну тонкоплівкових захисну структуру. Іонно-променева літографія дозволяє проводити локальне легування домішок з дуже високою роздільною здатністю ($<0,01$ мкм).

Фотолітографія. У разі фотолітографії, насамперед необхідно виготовити маску або шаблон, з заданим малюнком.

Виготовлення маски починається з отримання великомасштабного макета, малюнка, так званого оригіналу топології мікросхеми. Після завершення розробником проекту схеми повинні бути визначені місця розташування усіх її елементів на поверхні кристала. Незважаючи на те, що сторони кристала зазвичай мають розміри від 0,5 до 5 мм, оригінал повинен бути зроблений у багато разів більше кристала, щоб при відтворенні малюнка уникнути великих похибок і забезпечити розумний розмір цього рисунка при виготовленні оригіналу. Наступний етап у процесі фотолітографії полягає у фотографуванні оригіналу великий фотокамерою. Зазвичай оригінал в 500 разів більше остаточного малюнка на кристалі мікросхеми.

Наступні фотографії робляться з зменшенням початкового малюнка спочатку в 100, а потім в 10 разів, щоб в остаточному зображенні на пластині вийшов точний розмір малюнка. Потім фотошаблон використовується для подальшого тиражування вихідного зображення. Отримані таким чином

фотошаблони використовуються в фотолітографії в якості маски для передачі малюнка на поверхню підкладки, покритої шаром фоторезисту.

Фоторезисти — складні полімерні речовини, вони покривають тонкою плівкою поверхню пластини, на яку має бути перенесено зображення. Фоторезистивна плівка експонується у синьому або ультрафіолетовому світлі, після чого у відповідності з малюнком фотошаблонна на ній утворюються засвічені і не засвічені області.

Розрізняють позитивні і негативні фоторезисти. При прояві позитивних фоторезистів видаляються освітлені області, а при прояві негативних фоторезистів — неосвітлені області.

Залежно від використовуваного фоторезисту розрізняють негативний фотошаблон, на якому зображення геометричної фігури виконано світлими лініями на темному полі, і позитивний фотошаблон з темними лініями на світлому полі. Фотошаблони виготовляють або на скляних пластинах, або на полімерних плівках.

Зазвичай фоторезист наносять (в передових технологіях розпорошують) на обертину (2000-10000 об/хв) поверхню пластини і під дією відцентрових сил він рівномірно розподіляється по поверхні пластини. Товщина фоторезисту 0,6-6 мкм (товщина залежить від типу фоторезисту).

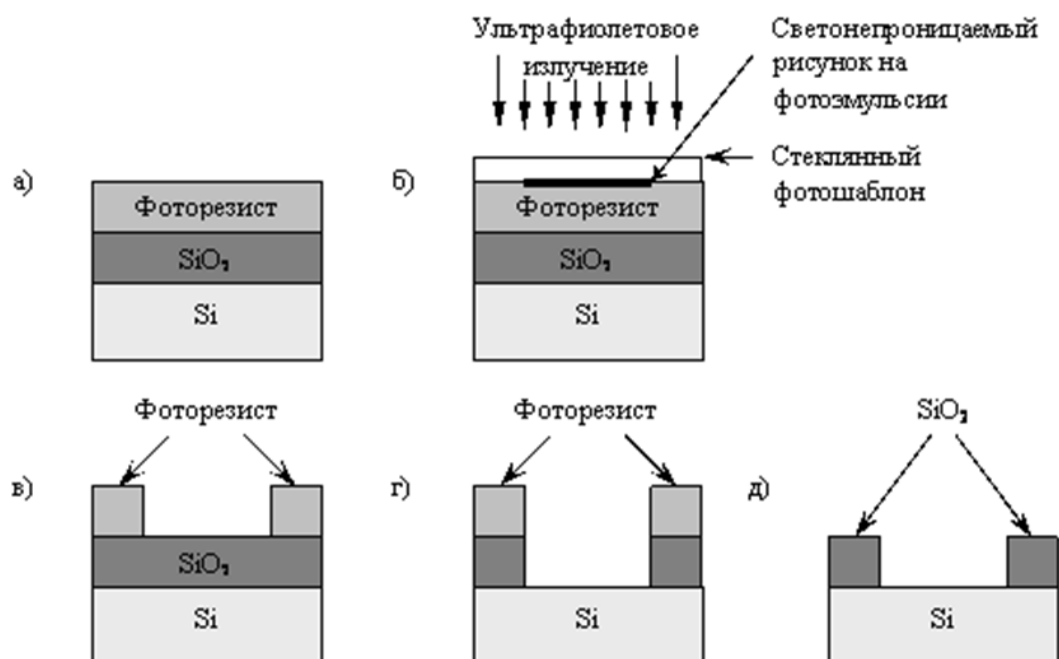


Рис.2.9.Етапи фотолітографічного процесу: а) первинне покриття;
б)контактний друк; в) після проявлення; г) після видалення окису;
д) після видалення фоторезисту

Щоб отримати зображення на пластині необхідної якості, необхідно одночасно і взаємопов'язано змінювати та час експонування малюнка, і час його прояви. Найбільш поширеним методом отримання малюнка на пластині є метод контактної друку, для ілюстрації якого розглянемо випадок, коли в шарі двоокису кремнію, розташованому на підкладці, необхідно зробити невеликі отвори. Спочатку на окисний шар наноситься фоторезист (в даному випадку позитивний, рис.2.9 а), а потім до фоторезисту прикладається скляний фотошаблон (маска) з малюнком, відповідним тієї частини оксиду, яка повинна бути видалена. Після цього здійснюється експонування структури в ультрафіолетових променях (рис. 2.9 б).

У процесі прояву неекспоновані ділянки фоторезисту розчиняються, залишаючи при цьому вікна в фоторезисте. Фоторезист, що покриває решту оксиду, хімічно стійок до буферного кислотного розчину, звичайно використовуваному для травлення окисного шару з метою отримання вікон в окисле (рис.2.7, в, г). Потім залишився шар фоторезисту видаляється з підкладки, і підкладка стає готовою для проведення наступного технологічного етапу (рис. 2.9, д).

Травлення:

Необхідна конфігурація чутливого елемента з глухими і наскрізними отворами, щілинами і пазами забезпечується переважно локальних хімічним травленням. Доступ до кремнію травителів забезпечений розкриттям захисного шару літографічними процесами.

За характером взаємодії з кремнієм хімічне травлення є реакцією розчинення, яке в залежності від кінетики ділиться на молекулярне, іонне і реактивне [10,11,12].

В залежності від умов травлення розрізняють два механізми травлення кремнію при відсутності зовнішнього джерела струму: електрохімічний і хімічний.

Електрохімічний механізм характеризується протіканням на поверхні кремнію двох реакцій: анодного окислення і катодного відновлення окислювача.

При хімічному механізмі травлення на поверхні кремнію протікають окислювально-відновні реакції, пов'язані з чисто хімічним взаємодією молекул травителя з поверхневими атомами. Склад травителей, як правило, підбирається досвідченим шляхом. Травителі — це суміші, що складаються з окислювача, комплексоутворювача, розчинника, прискорювача або сповільнювача реакцій окислення і розчинення і спеціальних добавок, що забезпечують, наприклад, виборче травлення.

Хімічне травлення підрозділяють на ізотропний, анізотропне і селективне.

Ізотропний травлення є одним з найбільш відомих і поширених способів локального мікропрофілювання. Характерною особливістю ізотропного травлення є однаковий вплив у всіх кристалографічних напрямках. Форма одержуваного при цьому мікропрофілю показана на рис.2.10. Таке травлення називають поліруючі або хімічним поліруванням.

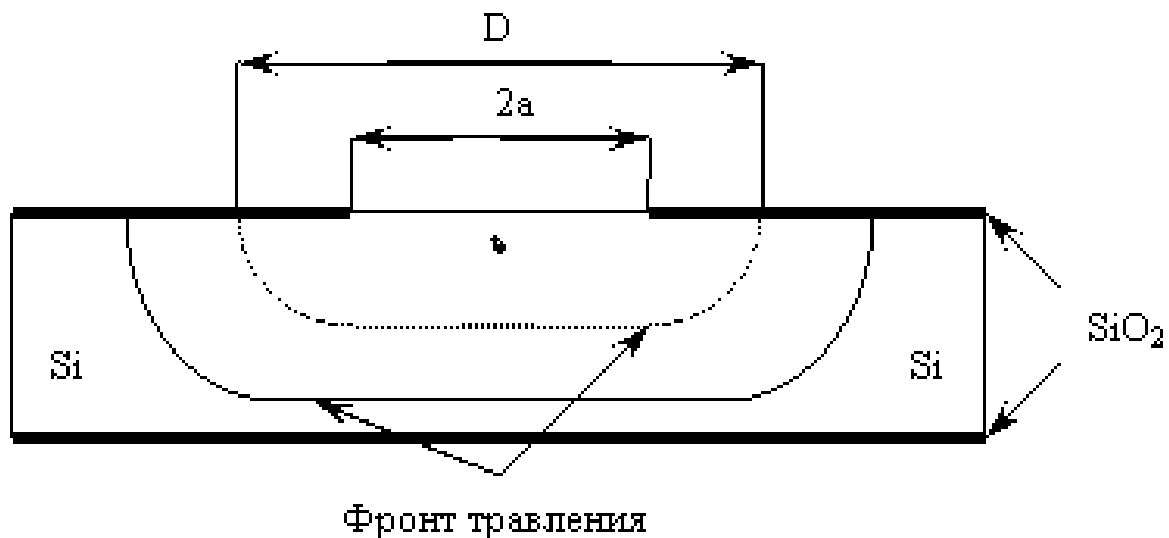


Рис.2.10 Форма мікропрофілю при ізотропному травленні

Як ізотропних травителів використовуються травителі на основі азотної та плавикової кислот. Швидкість травлення напівпровідника залежить від великого числа факторів таких як: тип травителя, швидкість відводу продуктів реакції і підведення реагентів до поверхні напівпровідника; його температура; наявність або відсутність дефектів, як в самому напівпровіднику, так і в захисній масці, забезпечує локальність травлення; випаровування травителя, що приводить до зміни його концентрації і т. д. Більшість цих факторів погано піддається контролю. Це призводить до того, що не відтворюваність швидкості травлення вносить основний внесок у не відтворюваність геометрії пружного елемента.

Особливістю анізотропного травлення в тому що в різних кристалографічних напрямках швидкість видалення атомних шарів з поверхні травлення має різні значення. Це пояснюється різною щільністю упаковки атомів у різних площинах, а також різним характером зв'язку поверхневих атомів між собою і з атомами, розташованими в обсязі кристалічної структури напівпровідника [13].

Анізотропні речовини являють собою багатокомпонентні розчини, що складаються з окислювача кремнію до розчинника, гідратованої двоокису і сповільнювача або прискорювача процесу травлення дивлячись що нам потрібно. Процес анізотропного травлення являє собою поетапне видалення атомних шарів (поступово шар за шаром) з поверхні кристала.

Виявляється швидкість травлення двоокису кремнію у всіх застосовуваних травителях значно нижче ніж швидкості травлення кремнію. При локальному травленні захист поверхні кремнієвої пластини від травлення може бути здійснена за допомогою оксидної плівки. Оксидні маски локалізують процес травлення профільованих заглиблень, наскрізних пазів та отворів.

2.5 Імітаційне моделювання акселерометру

Програмна модель маятникового мікромеханічного акселерометра

Побудуємо програмну модель одновісного лінійного акселерометра у середовищі MATLAB, використовуючи функцію *ode45* та SIMULINK. У якості математичної моделі будемо використовувати рівняння акселерометра. Структурна схема програмної моделі представлена нижче на рис.2.11

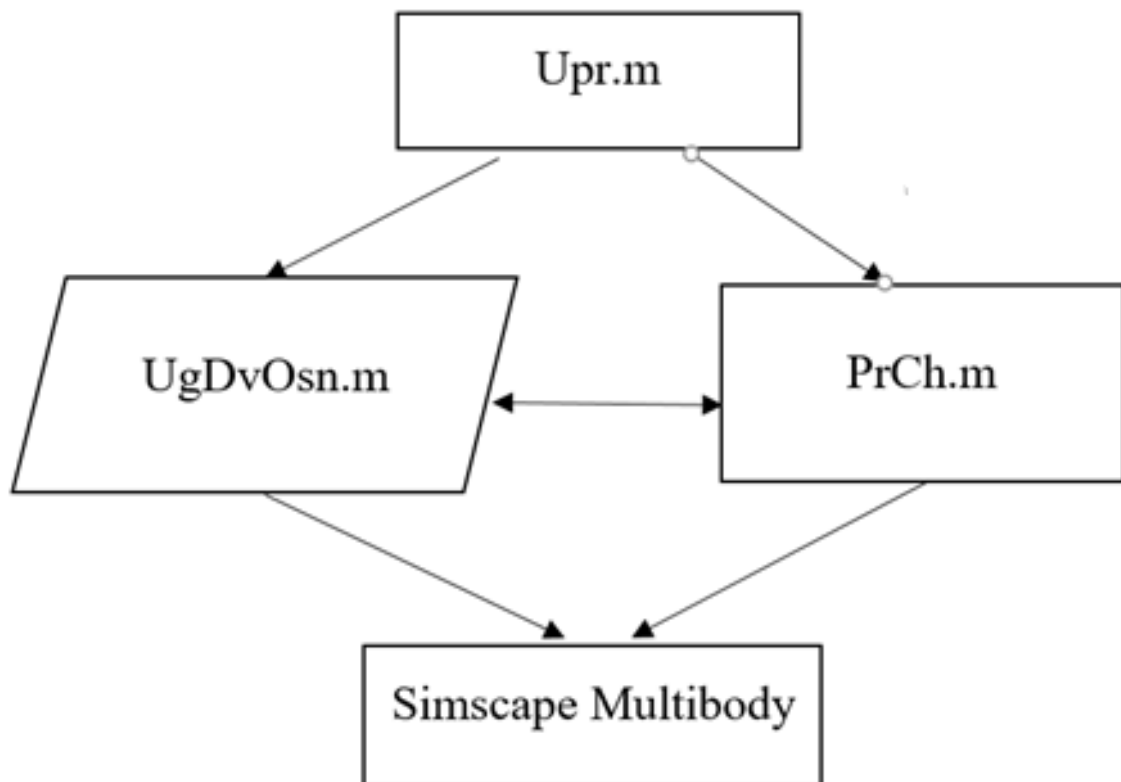


Рис. 2.11 Схема програмної моделі акселерометра

Головною є керувальна програма **Upr.m**. В ній задаються параметри чутливого елемента та руху основи. Спочатку виконується задання розрахованих параметрів акселерометра таких як маса, момент інерції, коефіцієнт демпфування та жорсткість підвісу. Параметрів руху основи: прискорення, частота коливань та амплітуда. Керувальна програма здійснює виклик S-моделі акселерометру та вивід результатів у вигляді графіків та рухомої анімації.

Текст керувальної програми наведено нижче.

```
clc, clear all
```

```

global c f m l
dtr=pi/180; rtd=180/pi;
%% Параметри чутливого елемента
c=4476.5;
f=2;
I=8.2e-5;
m=2.6e-5;
l=3.9e-3;
%% Параметри руху основи
A0=0;
Am=100e8;
w=500*2*pi;
%% Интегрирование
Tk=0.02; y0=[0 0];
Hi=1e-6;
sim('Acc2013b')
t=tout; A1=yout(:,1);
n=length(A1);
sprintf('%0.6f',-min(A1))
figure(1)
plot(t,A1,'linewidth',3),grid
xlabel('Час, c^2');
ylabel('Кут, град. ');
legend('\theta')
set(gca,'FontSize',14);

```

Чисельне інтегрування рівняння (2.1) проводиться у середовищі Matlab Simulink з використання S-function. Ця стандартна процедура дозволяє об'єднати інтерфейс Simulink з можливістю формування програми правих частин у вигляді програмного коду у Matlab. Текст функції правих частин **prCh** наведено нижче.

```

function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = prCh(t,x,u,flag,I,y0)
global c f m l
switch flag,
    case 0,
        [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes(y0);
    case 1,
        sys=mdlDerivatives(t,x,u,I);
    case 2,
        sys=mdlUpdate(t,x,u);
    case 3,
        sys=mdlOutputs(t,x,u);
    case 4,
        sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
    case 9,
        sys=mdlTerminate(t,x,u);
    otherwise
        DAStudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
end

```

```

function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes(y0)
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 2;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 2;
sizes.NumInputs = 1;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = y0;
str = [];
ts = [0 0];

```

```
simStateCompliance = 'UnknownSimState';
```

```
function sys=mdlDerivatives(t,x,u,I)
```

```
global c f m l
```

```
sys(1)=x(2);
```

```
sys(2)=(m*u*l-f*x(2)-c*x(1))/I;
```

```
function sys=mdlUpdate(t,x,u)
```

```
sys = [];
```

```
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
```

```
sys = [x];
```

```
function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)
```

```
sampleTime = 1;
```

```
sys = t + sampleTime;
```

```
function sys=mdlTerminate(t,x,u)
```

```
sys = [];
```

Для роботи з S-function необхідно, у якості вхідних величин, використовувати об'єкти Simulink, тому прискорення основи формується використовуючи блок SinWave. В ньому задаються необхідні параметри лінійного прискорення.

Отриманий після інтегрування вихідний вектор виводиться на екран у вигляді графіків у керувальній програмі.

Створену тривимірну модель осьового акселерометра можна імпортувати до середовища Simulink, використовуючи доповнення Simscape Multibody. Завдяки цьому можна проводити дослідження акселерометра не тільки інтегруючи диференційні рівняння руху, а й спостерігати поведінку моделі чутливого елемента у реальному часі.

Програмна модель акселерометра у середовищі Simulink з імпортованою моделлю Simscape Multibody представлена на рис.2.12.

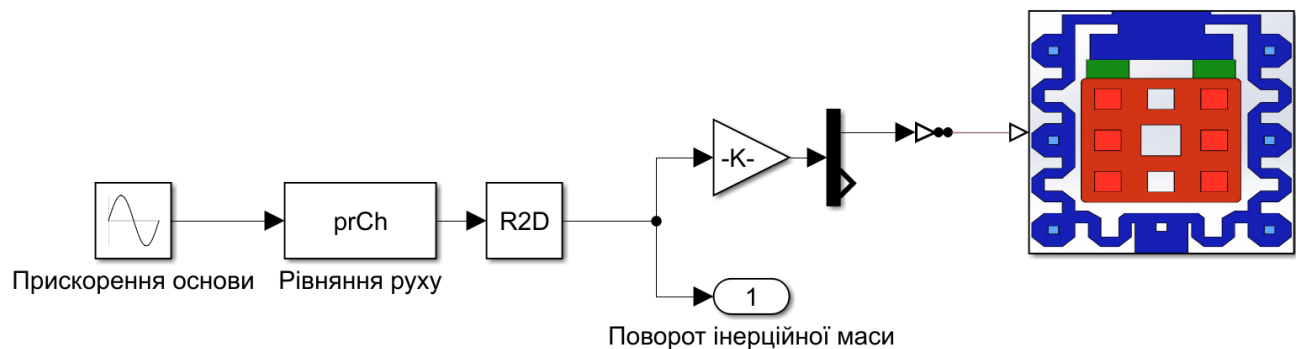


Рис. 2.12. Програмна модель акселерометра у середовищі Simulink

На рис.2.13 подано схему імпортованої тривимірної докладніше

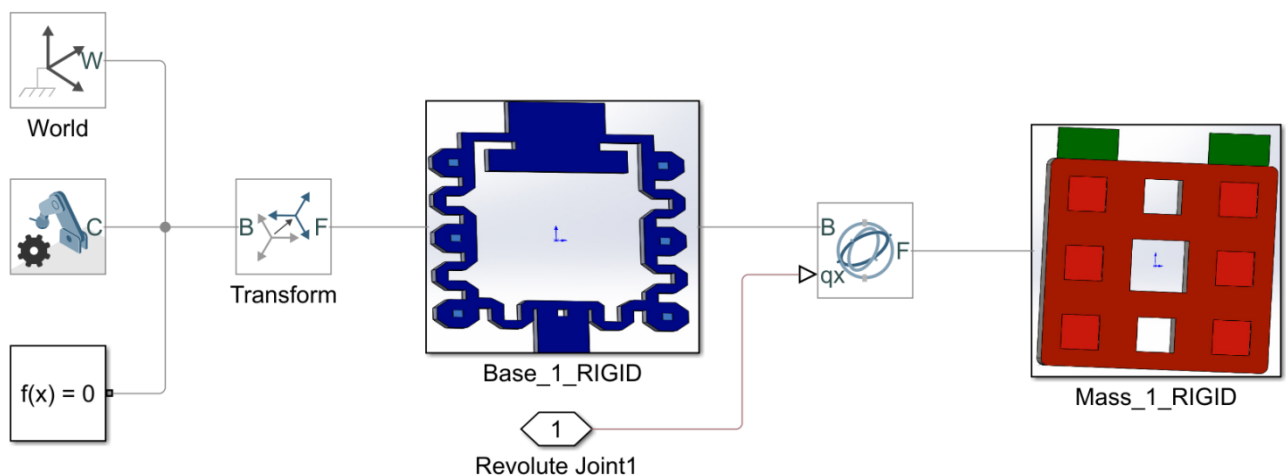


Рис. 2.13 Імпортована тривимірна модель

З рис.2.13 видно, що модель складається з двох елементів: основа та інерційна маса, що поєднуються зв'язком *Gimbal Joint*, що активується при певному вхідному русі. Це дозволяє реалізувати кутовий рух інерційної маси навколо осі підвісу як у реальному акселерометрі. У якості такого руху використано результат інтегрування правих частин рівняння (2.1).

Моделювання акселерометра

Використовуючи програмну модель акселерометра можна провести моделювання динаміки ЧЄ при дії різноманітного прискорення основи та при

зміні конструктивних параметрів чутливого елемента. Це дозволить встановити адекватність та роботоспроможність приладу.

Були проведені серії моделювання акселерометра при дії постійного та гармонічного прискорення.

Результати моделювання акселерометра при дії постійного прискорення представлені нижче.

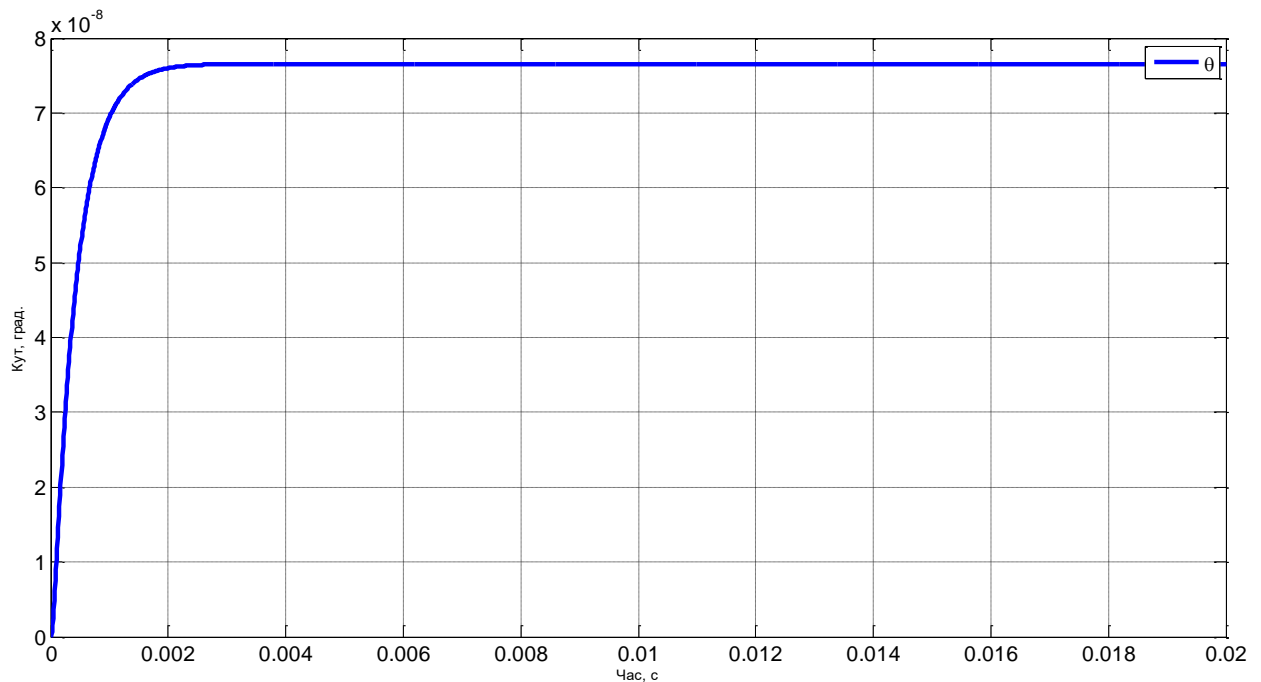


Рис. 2.14. Відхилення інерційної маси акселерометра при дії постійного прискорення

З рис.2.14 видно, що при дії постійного прискорення, інерційна маса після перехідного процесу відхиляється на певний постійний кут. Цей кут пропорційний величині діючого постійного прискорення. Проведемо серію дослідів з метою встановлення максимального прискорення, при якому акселерометр може працювати в режимі прямого вимірювання. Результати приведено на рис.2.15.

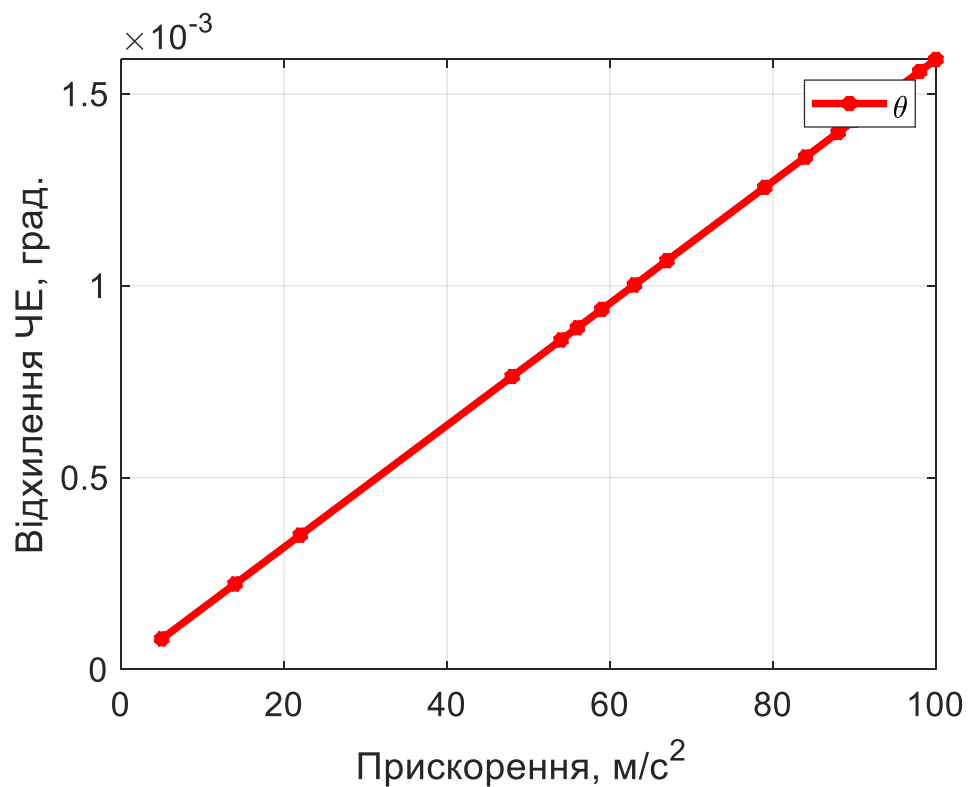


Рис.2.15 Відхилення чутливого елементу при різному прискоренні

З рис.2.15 видно, що навіть при прискоренні основи 100 m/s^2 , відхилення інерційної маси не перевищує граничного значення, що дозволяє використовувати акселерометр в режимі прямого вимірювання.

Результати моделювання акселерометра при дії гармонійного прискорення представлені нижче на рис.2.16.

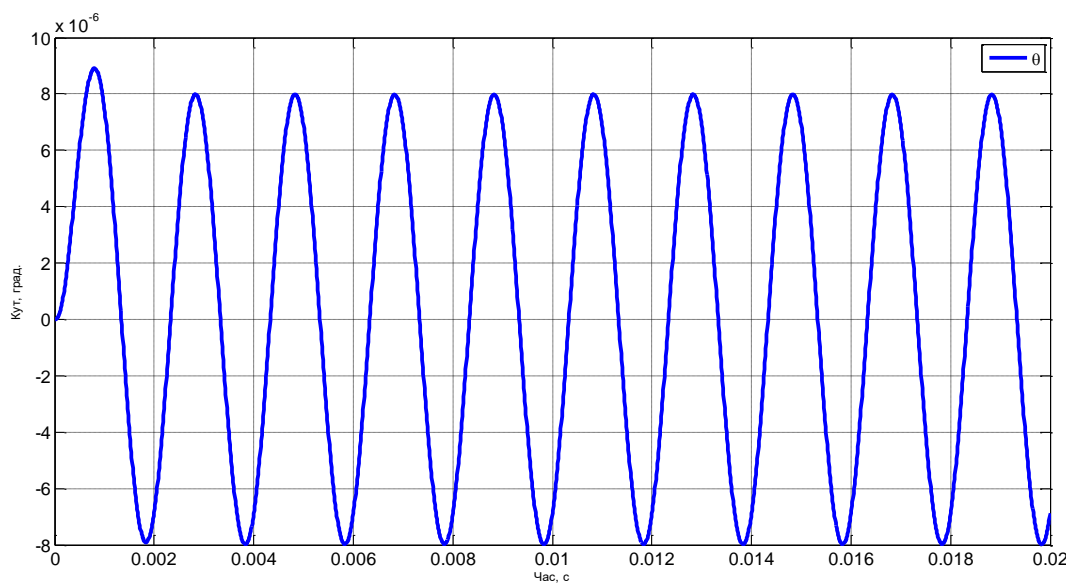


Рис. 2.16. Моделювання акселерометра при дії гармонійної вібрації

Амплітуда коливань інерційної маси пропорційна амплітуді вібрації основи. На рис.2.17 представлено результати серії експериментів моделювання руху ЧЕ при гармонічній вібрації основи.

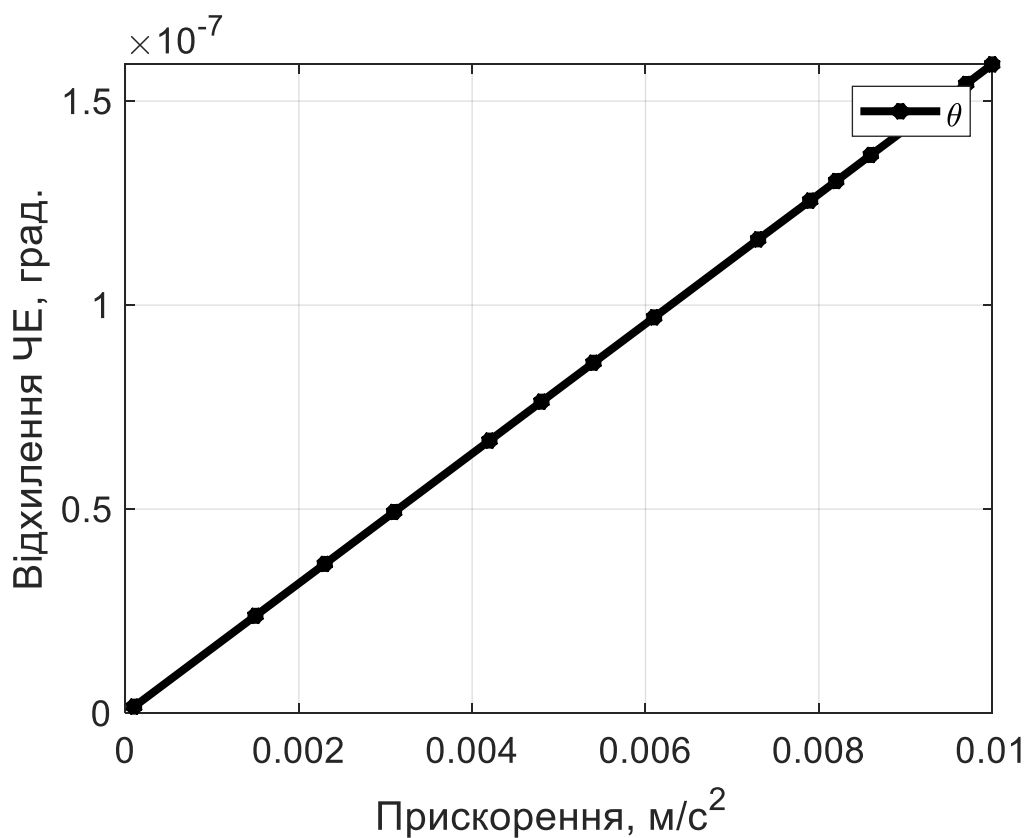


Рис.2.17 Відхилення чутливого елементу при гармонічному прискоренні

З рис.2.17, що в режимі прямого вимірювача акселерометр адекватно працює на вібруючій основі.

ВИСНОВОК:

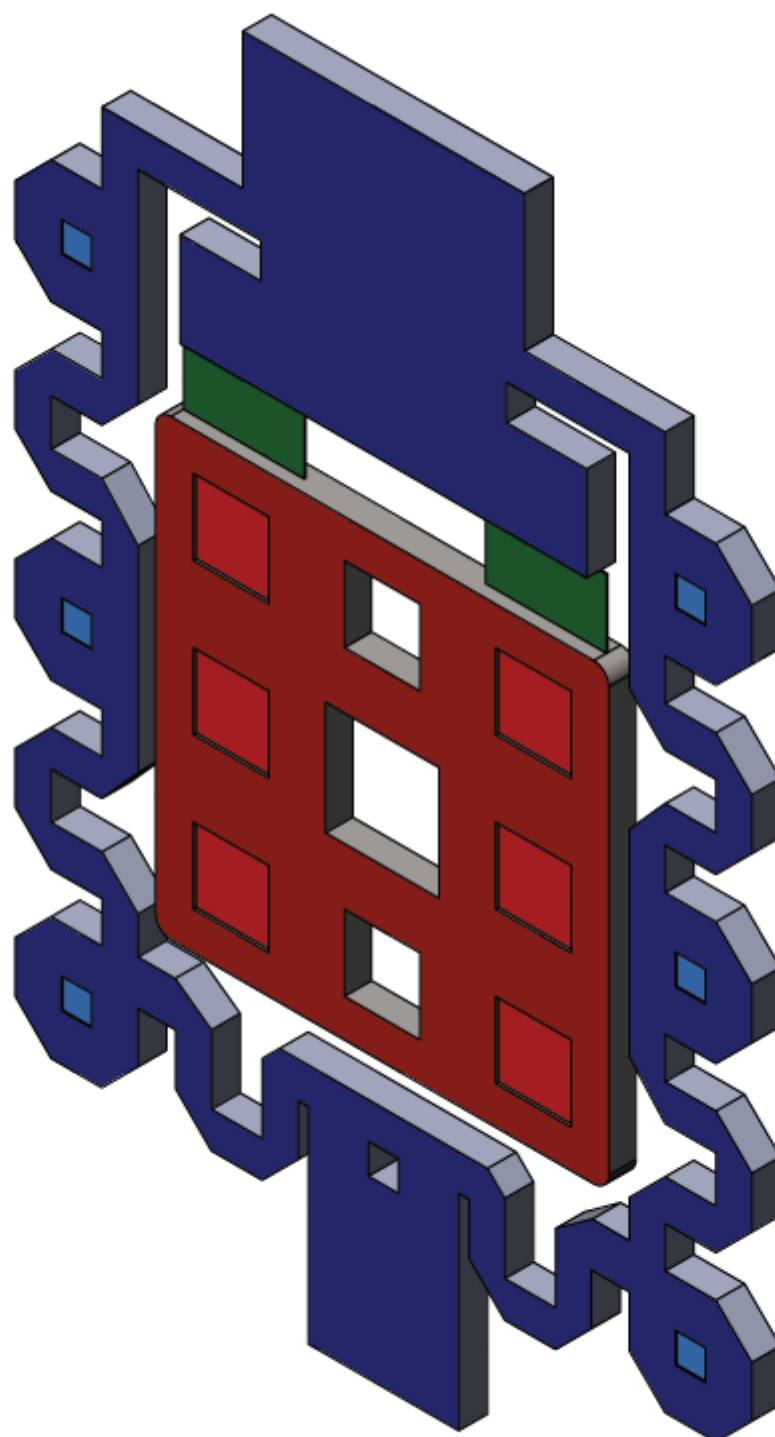
Технічні умови:

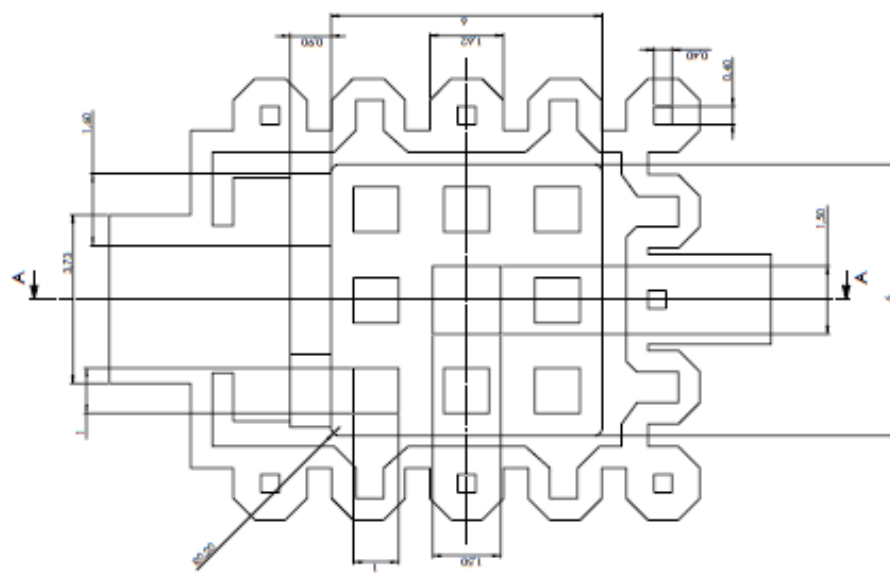
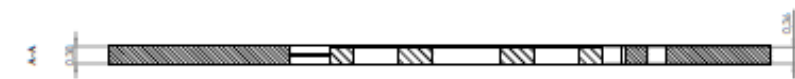
1 Розміри для довідок

2 Виготовлення методом травлення

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

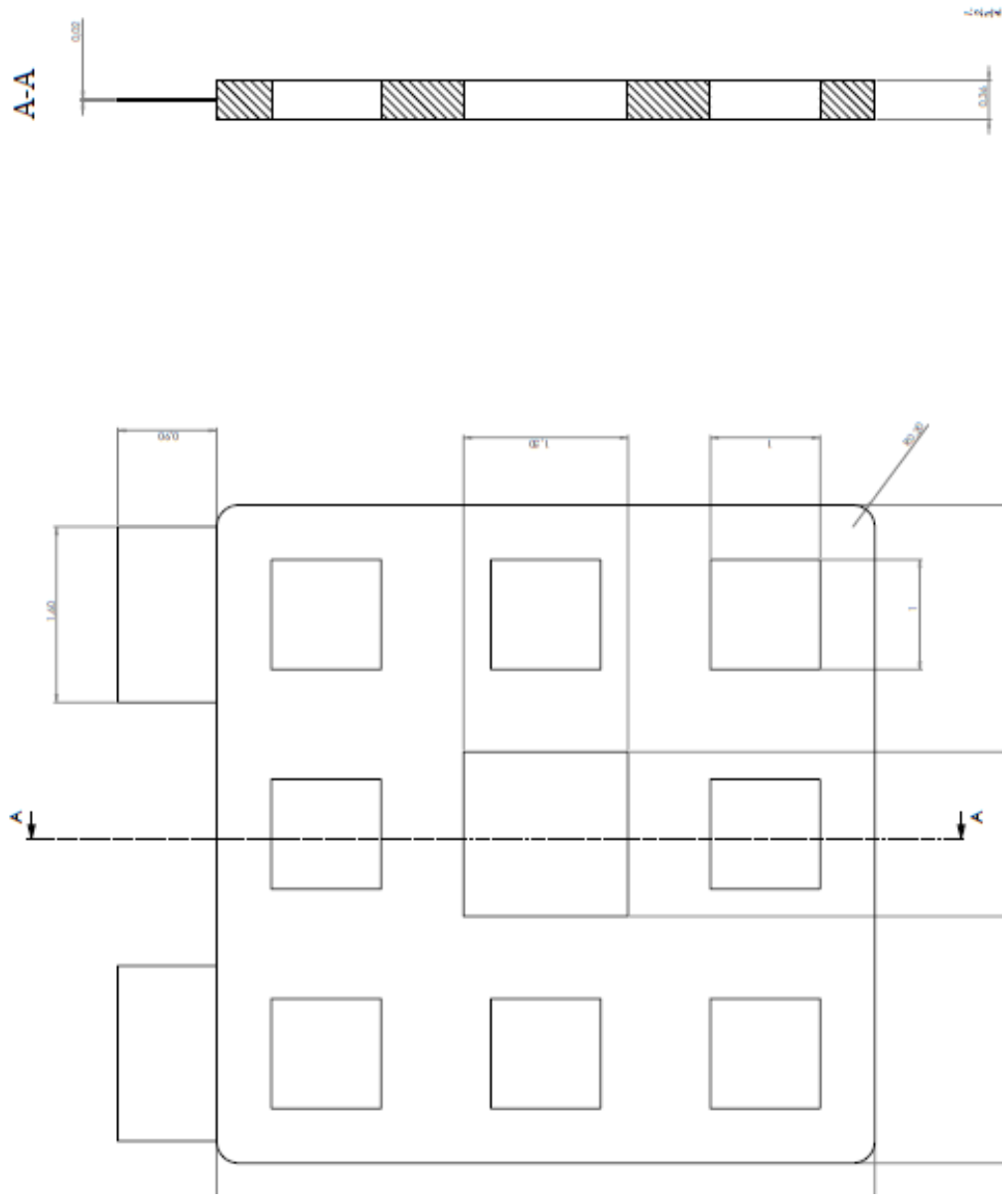
1. Microsoft Word - Тези [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://pbf.kpi.ua/old/arch/scientific/stud_conf_s4_2014.pdf
2. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов/ [Д. Козоріз, М.Красильщиков, К.Веремеєнко, К.Желтов, С.Кім, М.Серебряков] — ФИЗМАТЛИТ, 2009 — 554с.
3. Трёхосевой микромеханический акселерометр для систем мониторинга технического состояния сооружений [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C111/058.pdf>
- 3.1. Браславский Д. А., Логунов С. С. Приборы на самолете. — М.: Оборонгиз. Главная редакция авиационной литературы, 1947. — 524 с.
4. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. Учебное пособие. - Тульский Государственный Университет. Тула, 2002.
5. MEMS technologies and applications. - SPIE PRESS. 2000, Vol. PM85, - 516 p.
6. Броудай И., Мерай Д. Физические основы микротехнологии. - М.: Мир, 1985 - 494с.
7. Тилл У., Лахсон Дж.. Интегральные схемы. Материалы, приборы, изготовление. - М.: Мир, 1985. - 504 с.
8. Обухов В.И. Технология интегральных измерительных преобразователей. - Нижний Новгород: РИО НГТУ, 1996. - 150 с.
9. Вавилов В.Д., Поздьяев В.И. Конструирование интегральных датчиков. - М.: Изд-во МАИ, 1993. - 68 с.



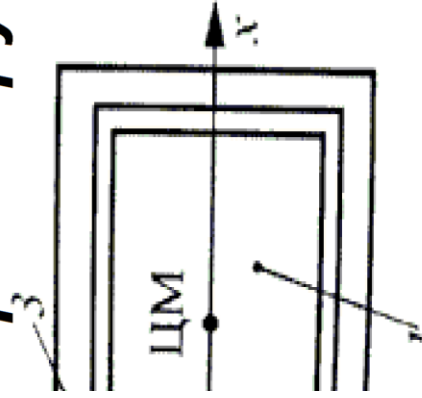


0.50

1.50



аційна модель маятнікового
перометру



$$J_z \ddot{\varphi} + f_{\varphi} \dot{\varphi} + G\varphi = n$$

